

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина

М. А. Денисов

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
ANSYS и CAE-проектирование**

Учебное пособие

Екатеринбург
УрФУ
2011

УДК 004.9:536.2(075.8)

ББК 31.31в6я73

Д33

Рецензенты:

директор по науке и технике ОАО «ВНИИМТ», заслуженный металлург РФ, д-р техн. наук Г.М. Дружинин; зав. каф. «Инженерная графика» Уральского государственного горного университета, д-р пед. наук, канд. техн. наук Е.И. Шангина

Денисов, М.А.

Д33 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ANSYS и CAE-проектирование : учебное пособие /

М. А. Денисов. Екатеринбург : УрФУ, 2011. 149 с.

ISBN 978-5-321-02043-2

Рассмотрены подходы к моделированию процессов в тепловых агрегатах, проектируемых на основе CAE-технологий (систем программных средств компьютерного инженерного анализа). Книга может использоваться для самостоятельного овладения вычислительными программными комплексами ANSYS Multiphysics и ANSYS FLOTTRAN, которые не имеют достаточно удобного и систематического русскоязычного описания методов решения теплофизических задач. В частности, с этой целью разработан учебно-справочный комплект примеров решения наиболее распространенных и практически важных задач. На примерах рассмотрены возможности и методы проектного инженерного анализа с использованием программного комплекса ANSYS CFX.

Пособие рекомендовано Методическим советом УрФУ для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям 150400 - Металлургия и 150100 - Материаловедение и технология материалов, а также для аспирантов и специалистов соответствующих специальностей.

Библиогр.: 26 назв. Табл. 4. Рис. 98.

Учебное пособие подготовлено в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по теме: «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области металлургических технологий» (Государственный контракт № 02.740.11.0152).

УДК 004.9:536.2(075.8)

ББК 31.31в6я73

ISBN 978-5-321-02043-2

© Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б. Н. Ельцина, 2011

© Денисов М. А., 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава 1. Постановка теплофизических задач в ANSYS Multiphysics.....	7
1.1. Основные уравнения и условия однозначности в анализе теплофизических процессов металлургии	7
1.2. Задание граничных условий и параметров теплообмена в ANSYS Multiphysics.....	14
1.3. Особенности решения задач в программе FLOTTRAN	18
Глава 2. Решение задач в пакете ANSYS Multiphysics.....	31
2.1. Графический интерфейс пользователя.....	31
2.2. Этапы препроцессорной подготовки решения.....	34
2.3. Этап получения решения и постпроцессорной обработки результатов.....	48
Глава 3. Учебно-справочный комплект решений теплофизических задач в пакете ANSYS Multiphysics.....	51
3.1. Стационарный теплообмен в прямоугольной заготовке. Заданные температуры поверхностей	51
3.2. Стационарный теплообмен в двумерной перфорированной плите. Смешанное задание граничных условий.....	56
3.3. Стационарный теплообмен в двумерной многослойной стенке. Нагрев группы тел.....	64
3.4. Стационарный теплообмен в рекуператоре с трехмерными ребренными стенками.....	71
3.5. Нестационарный теплообмен. Нагрев пластины в печи с жидким теплоносителем.....	78
3.6. Нестационарный теплообмен. Нагрев в печи заготовки со слоем окалины на поверхности.....	84
3.7. Нестационарный теплообмен. Нагрев пластины по заданному режиму с переменной во времени нагрузкой.....	94
3.8. Вариант задачи нестационарного теплообмена при нагреве пластины по заданному режиму.....	98
3.9. Стационарный теплообмен в пластине, поверхности которой нагреваются излучением.....	101

3.10. Задачи гидроаэродинамики. Пакет ANSYS/FLOTRAN.....	106
Глава 4. Программный комплекс ANSYS CFX в CAE–технологиях.....	128
4.1. Компьютерные технологии проектирования.....	128
4.2. Особенности вычислительного процесса в ANSYS CFX.....	130
4.3. Инженерный анализ при проектировании устройств нагрева металла.....	135
4.4. Пример использования ANSYS CFX при обосновании выбора способа отопления печей	144
Библиографический список.....	146

ВВЕДЕНИЕ

В книге рассматриваются технологии и средства компьютерного проектирования тепловых устройств. К ним обычно относят: **CAD** (*Computer Aided Design*) систему автоматизированного проектирования — программные пакеты, предназначенные для создания чертежей, 3D - моделей и документации, и **CAE** (*Computer-aided engineering*) систему программных средств для инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов. Одна из наиболее развитых систем «тяжелого класса» проектирования базируется на программном пакете **Ansys**, который позволяет решать множество конструкторско-технологических задач.

В главах 1 и 2 пособия рассматриваются особенности расчетного анализа теплофизических процессов в пакетах программ ANSYS Multiphysics и ANSYS FLOTTRAN, входящих в систему ANSYS. Глава 3 содержит учебно-справочный комплект решений теплофизических задач в пакете ANSYS Multiphysics. Комплект разрабатывался специально для использования в профессиональной и учебной деятельности специалистов и студентов соответствующих специальностей. Глава 4 показывает на примерах возможности и методы проектного инженерного анализа с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Пакет CFX - это профессиональный аналитический комплекс для решения термо -, гидро -, газодинамических задач, лидирующий среди программ своего профиля.

ANSYS Multiphysics (Mechanical APDL) - одна из самых мощных и универсальных многоцелевых систем конечно-элементного (МКЭ) анализа для широкого круга инженерных дисциплин. С ее помощью проводятся расчетные исследования прочности, распространения тепла, механики жидкостей и газов, электромагнетизма, оптимизации, решаются связанные задачи. Возможности системы могут наращиваться при использовании внутреннего языка параметрического программирования (APDL), языков FORTRAN и C++. Важной частью пакета является программа **FLOTTRAN**, которая позволяет решать разнообразные задачи

вычислительной гидроаэродинамики (CFD), включая ламинарное и турбулентное течение несжимаемых или сжимаемых потоков.

При решении задач обычно выделяют этапы процесса: препроцессорный (подготовительный этап), этап получения решения и постпроцессорный (этап обработки результатов). Все функции программы объединяют в группы, которые называются процессорами. Программа имеет один препроцессор, один процессор решения, два постпроцессора и несколько вспомогательных процессоров, включая оптимизатор.

На препроцессорном этапе выбирается тип расчета, строится или импортируется из другой программы геометрическая модель объекта. Затем проводится конечно-элементное разбиение модели (строится сетка), задаются свойства материалов. К модели прикладываются нагрузки (в том числе граничные условия, усилия, перемещения), задаются исходные данные.

Этап решения начинается запуском программы на счет, результаты (значения перемещений, температур, напряжений, деформаций, скоростей и тепловых потоков) записываются в специальные файлы.

Отображение и анализ результатов решения задачи выполняются *общим постпроцессором*, который отображает результаты одного шага решения, и *постпроцессором истории нагружения*, позволяющим просматривать изменение результатов во времени. В обоих случаях данные могут представляться графически или в виде листинга значений, с использованием данных могут проводиться вычисления.

Глава 1

ПОСТАНОВКА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ANSYS Multiphysics

1.1. Основные уравнения и условия однозначности в анализе теплофизических процессов металлургии

1.1.1. Уравнение энергии

Уравнение выражает закон сохранения энергии для каждого элементарного объема dv (параллелепипеда с размерами dx, dy, dz). В направлении оси x теплопроводностью подводится поток тепла

$Q'_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} dy dz d\tau$. Через противоположную грань уходит

$Q''_x = -\lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(t + \frac{\partial t}{\partial x} dx \right) dy dz d\tau$. Остается в объеме

$$dQ_x = Q'_x - Q''_x = \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx dy dz d\tau.$$

Потоки dQ_y, dQ_z , находятся аналогично dQ_x , и определяется величина $dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z$.

В результате поступления тепла меняется теплосодержание объема, $dQ \approx c_p \rho \frac{Dt}{d\tau} dx dy dz d\tau$. Полная производная

$\frac{Dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z}$ связана с движущейся материей

(субстанцией) и часто называется субстанциональной. Она показывает, что изменение теплосодержания является результатом изменения температуры объема среды и конвективного перемещения тепла. На основании изложенного записано *уравнение теплопроводности Фурье–Кирхгофа*

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \frac{\partial t}{\partial z} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right),$$

где w_x, w_y, w_z – компоненты скорости движения среды; $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ – коэффициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности; c_p – удельная теплоемкость.

При наличии тепловыделения в объеме (объемные химические реакции горения, работа трения и др.) и радиационного теплопереноса уравнение энергии имеет вид

$$\rho c \frac{Dt}{d\tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v + \text{div} \bar{q}_r, \quad (1.2)$$

где q_v – интенсивность внутренних источников тепла, Вт/м³; $\text{div} \bar{q}_r = \frac{\partial \bar{q}_{r,x}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{q}_{r,y}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{q}_{r,z}}{\partial z}$ – дивергенция вектора излучения (поток вектора через замкнутую поверхность объема, отнесенный к величине этого объема).

В расчетной практике большое значение имеют частные случаи уравнения энергии. У твердого тела $w_x=0$; $w_y=0$; $w_z=0$ и уравнение (1.1) имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (1.3)$$

При стационарной теплопроводности с учетом $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ получено

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0. \quad (1.4)$$

Это уравнение называют **уравнением Лапласа**. При стационарном процессе с внутренними источниками тепла уравнение энергии имеет вид

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{\lambda}. \quad (1.5)$$

Выражение (1.5) называют **уравнением Пуассона**.

Используя обозначения: $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{k}$ – векторный

дифференциальный оператор набла (частично совпадает с оператором Гамильтона)¹; и $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы, получим векторную запись уравнения (1.2)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w \text{grad} t = a \nabla^2 t + q_V + \text{div} \bar{q}_r, \quad (1.6)$$

где w – скорость жидкости.

1.1.2. Уравнение неразрывности (сплошности)

Вывод уравнения основан на законе сохранения массы для любого элементарного объема. По аналогии с выводом предыдущего раздела определяется поток массы жидкости, втекающей в объем в направлении оси x , – $M'_x = \rho w_x dydzd\tau$. Масса, вытекающая из объема, – $M''_x = (\rho w_x + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} dx) dydzd\tau$. Изменение массы – $dM_x = M''_x - M'_x = \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} dx dydzd\tau$. Изменение массы компенсируется изменением плотности объема во времени

¹ Через оператор набла выражаются основные операции векторного анализа. Например:

градиент $\text{grad} \varphi = \nabla \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \bar{k}$ – вектор, показывающий направление наискорейшего роста некоторой скалярной функции φ от координат x, y, z (оператор набла умножен на **скалярную** величину);

дивергенция $\text{div} F = \nabla \cdot F = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$ – дифференциальный оператор, отображающий векторное поле на скалярное (оператор набла умножен на **векторную** величину). Физически, дивергенция отражает мощность источника или стока векторного поля ($\text{div} F > 0$ – в точке источник поля, $\text{div} F < 0$ – в точке сток поля, $\text{div} F = 0$ – источников нет, или они компенсируют друг друга).

Скалярное произведение $\nabla \cdot \nabla = \nabla^2 = \Delta$ называется **оператором Лапласа**. В декартовых координатах $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$.

$$dM_x + dM_y + dM_z = -\frac{\partial \rho}{\partial \tau} dv d\tau.$$

Отсюда после преобразований получено уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0. \quad (1.7)$$

Для несжимаемых жидкостей $\rho = \text{const}$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \quad (1.8)$$

В векторной форме уравнения (1.6) и (1.7) имеют вид соответственно

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho w) = 0 \quad \text{и} \quad \text{div} w = 0. \quad (1.9)$$

Характер взаимосвязи величин, входящих в уравнение неразрывности, хорошо иллюстрирует частный случай уравнения, записанный для «трубки тока». У трубки тока боковыми поверхностями являются «линии тока», касательные к которым совпадают с направлением скорости жидкости. **Частную запись уравнения неразрывности** широко применяют в приближенных практических расчетах процессов и агрегатов на участках течений с постоянной массой, например в трубах или каналах. При этом для двух произвольных сечений канала можно записать равенство

$$\rho_1 w_1 f_1 = \rho_2 w_2 f_2, \quad (1.10)$$

где ρ , w , f – плотность среды, скорость и площадь в сечении канала 1 или 2 соответственно. Из выражения (1.10) следует, что при постоянной плотности среды уменьшение площади поперечного сечения канала вдвое увеличит в два раза скорость потока.

1.1.3. Уравнения движения вязкой жидкости

1.1.3.1. Свойства, силы и напряжения в жидкости

На процесс движения жидкости большое влияние оказывают силы внутреннего трения. Свойство реальной жидкости оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно

другой называется **вязкостью**. Действие вязкости можно представить как перенос количеств движения молекулами, случайно перемещающимися из медленных слоев жидкости в быстрые, и наоборот. Если «медленные» молекулы оказались среди быстрых, то они мешают общему движению, «тормозят» его. Между слоями появляется внутреннее трение (касательные напряжения).

Касательные напряжения трения в зависимости от градиента скорости определяет формула Ньютона

$$S_{xy} = \mu \frac{\partial w_x}{\partial x}, \quad (1.11)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости. Жидкости (вода, воздух и др.), которые подчиняются закону (1.11) называются **ньютоновскими**. Неньютоновскими жидкостями, например, являются растворы полимеров.

В физике сила, действующая на единицу поверхности, называется давлением (напряжением поверхностной силы). Внутренние силы – это силы взаимодействия отдельных частиц внутри объема. Внешние силы бывают массовые (объемные) – пропорциональны массе и равномерно распределены по объему (например, сила тяжести) и поверхностные – действуют на поверхности, ограничивающие объем (например, реакции стенок сосуда на жидкость). Поверхностные силы имеют составляющие: перпендикулярную поверхности (создают нормальное напряжение) и параллельную (создают касательное напряжение). Градиент скорости можно представить как относительный сдвиг соседних слоев жидкости – деформацию сдвига. Это означает, что выражение (1.12) устанавливает связь касательного напряжения в жидкости со скоростью относительной деформации слоев.

1.1.3.2. Уравнения Навье–Стокса

В потоке жидкости выделяется элементарный объем с размерами ребер dx , dy , dz . На объем действуют: сила тяжести, сила давления и сила трения. При выводе уравнения (из-за громоздкости вывод здесь не рассматривается) использован второй закон Ньютона: равнодействующая сил, действующих на элемент, равна

произведению массы элемента на его ускорение.

Сила тяжести, приложенная к элементу, в проекции на ось x – $g_x \rho dx dy dz$, где g – ускорение свободного падения. Силы давления, действующие на элемент в направлении, противоположном движению жидкости, – $-\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz$. Силы трения направлены против движения жидкости, но их равнодействующая определяется разностью сил трения на противоположных боковых гранях элемента. Для трехмерного движения она равна $\mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) dx dy dz$. Здесь μ – коэффициент динамической вязкости, w_x – проекция скорости жидкости на ось x . В выражении учтено, что по закону Ньютона сила трения на единицу поверхности равна $\mu \frac{\partial w_x}{\partial x}$. Произведение массы элемента ρdv на ускорение записывается $\rho \frac{Dw_x}{d\tau} dv$.

В соответствии со сказанным уравнение Навье–Стокса принимает вид

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \rho \left(w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right), \\ \rho \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + \rho \left(w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right), \\ \rho \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \rho \left(w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (1.12)$$

Объединяя три уравнения в одно векторное уравнение, получим

$$\rho \frac{D\bar{w}}{d\tau} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \bar{w}. \quad (1.13)$$

1.1.3.3. Условия однозначности

Система дифференциальных уравнений имеет бесконечное множество решений. Выделить из них конкретное решение можно заданием *условий однозначности (краевые условия)*. Это значит,

нужно задать *геометрические условия однозначности* (задать форму и размеры объекта, в котором протекает процесс); *физические условия однозначности* (свойства среды и тел в объекте); *временные условия* (обычно задаются *начальные условия* – температура в некоторый начальный момент времени τ_0).

Особенности протекания процесса на границах тела задают *граничные условия однозначности*. Различают [1 – 3]:

Граничные условия I рода (условия Дирихле) –

задаются распределения температуры по поверхности тела во времени $T(x,y,z,\tau) = \varphi(x,y,z,\tau)$. Обычно условие используется для идеализированного описания реальных процессов в оценочных расчетах;

Граничные условия II рода (условия Неймана) –

на границе задается плотность теплового потока как функция

$$\text{координат и времени } -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \psi(x,y,z,\tau); \quad (1.14)$$

Граничные условия III рода –

задается плотность теплового потока конвекции на границе как функция температуры поверхности тела t_C и температуры окружающей тело среды $t_{Ж}$ в виде

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha_K (t_C - t_{Ж}), \quad (1.15)$$

где α_K – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К).

Данное условие часто распространяют на процессы переноса тепла излучением. Для этого тепловой поток на стенку записывают в виде суммы потока тепла, переносимого конвекцией, и потока, переносимого излучением,

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha_K (t_C - t_{Ж}) + \varepsilon_{\text{ПР}} \sigma_0 (T_C^4 - T_{Ж}^4), \quad (1.16)$$

где $\varepsilon_{\text{ПР}}$ – приведенная степень черноты системы; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана. Отсюда получено выражение для коэффициента теплоотдачи излучением

$$\alpha_K = \frac{\varepsilon_{\text{ПР}} \sigma_0 (T_C^4 - T_{Ж}^4)}{t_C - t_{Ж}}; \quad (1.17)$$

Граничные условия IV рода –

задают условия на границе контакта двух сред с разными

теплофизическими свойствами. Если на границе нет выделения или поглощения тепла, то обе среды имеют одинаковые температуры и тепловые потоки

$$\begin{aligned} -\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial n} \Big|_C &= -\lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial n} \Big|_C, \\ t_1 \Big|_C &= t_2 \Big|_C. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Если на границе идут процессы с выделением или поглощением тепла, например, при фазовых превращениях, то в первое уравнение вводятся величины соответствующих потоков тепла. Для учета свойств в области теплового контакта вводятся дополнительные термические сопротивления.

1.2. Задание граничных условий и параметров теплообмена в ANSYS Multiphysics

Подробная информация о методах и особенностях вычислений содержится в разделе HELP программы и в литературе [4–7]. Геометрические условия однозначности в ANSYS задаются при твердотельном геометрическом моделировании объектов. Физические условия однозначности включают задание свойств (для этого есть специальная процедура) и внутренних источников тепла. Отдельно задаются конвективные и радиационные граничные условия третьего рода.

«Теплообменные» условия однозначности в ANSYS следующие.

Граничные условия I рода –

задаются значения температуры (TEMP) на поверхностях, линиях, узлах, ключевых точках (если они выделены при построении геометрической модели).

В одном из примеров следующего раздела задается температура 500 К на линии границы (далее перечисляются опции, которые последовательно выбираются в окнах графического интерфейса):

**MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY→
→THERMAL →TEMPERATURE→ On Lines²**

Появляется меню «Apply TEMP». Щелчок курсором по верхней границе плиты, появляется штриховая линия →**ОК**. Появилось второе меню «Apply TEMP on lines». Задать Lab2= **TEMP**; VALUE= **500** →**ОК**. На поверхности появились треугольники, показывающие, что условия заданы;

Граничные условия II рода –

задаются значения удельного теплового потока (HFLUX) на поверхностях, линиях, узлах, элементах. (Удельный тепловой поток через единицу поверхности $q = -kA(dT/dx)$, где k – коэффициент теплопроводности; A – поверхность.) Положительное значение потока означает, что элемент принимает тепло.

В одномерных моделях тепловой поток не задать, поэтому используют плотность теплового потока (HEAT– тепловой поток, протекающий через узел за единицу времени);

Конвективные граничные условия III рода –

задается тепловой поток конвекцией (CONV) на внешней границе модели по закону Ньютона–Рихмана $q/A = h(t_s - t_f)$. Здесь q/A – удельный тепловой поток конвекции через поверхность A ; h – коэффициент теплоотдачи конвекцией; t_s , t_f – температура поверхности и температура окружающей среды. В одном из примеров работы задан конвективный тепловой поток на поверхности ($h=500$, $t_f=500$):

**MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY→
THERMAL→ CONVECTION→On Lines** Щелчок курсором по нижней границе плиты, появляется штриховая линия →**ОК**.

Появляется меню «Apply CONV on lines». В окна меню занести: SFL – **constant value**; VAL1. Film coefficient (коэффициент теплоотдачи) – **500**; SFL – **constant value**; VAL2I. Bulk temperature (температура среды) – **500**→**ОК**. Появляется предупреждение →**Close**. На верхней поверхности появилась стрелка, значит условие задано;

Радиационные граничные условия III рода –

задается тепловой поток излучения на внешней границе модели по $q_r = A\epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$,

² Здесь и далее показаны последовательности опций, выбираемых для задания граничных условий в окнах меню или во всплывающих окнах программы

где A – площадь поверхности; ε – степень черноты поверхности; σ – константа Стефана-Больцмана ($5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · °К)); T – абсолютная температура тела; T_0 – абсолютная температура среды, окружающей поверхность.

Программа позволяет осуществить приближенную оценку радиационного теплообмена поверхностей и лучепрозрачной среды при использовании угловых коэффициентов. Точность таких оценок невелика.

Задание объемного энерговыведения *HGEN* – задается тепловыделение внутри элемента, вызванное или химической реакцией, или электрическим током, которое имеет размерность потока тепла, отнесенного к единице объема. Используется последовательность операций ***MAIN MENU*→*SOLUTION*→*DEFINE LOADS*→*APPLY*→*THERMAL*→*HEAT GENERAT.***

Адиабатические условия – это частный случай граничного условия II рода с заданным тепловым потоком на поверхности, который равен нулю. Поверхность считается адиабатической по умолчанию, если на ней не заданы никакие граничные условия.

Условия симметрии рассматриваются как адиабатические.

Изложенное выше показывает, что в расчетах конвекции используется температура в первой степени, а в расчетах излучения температура в четвертой степени. Расчеты облегчает функция ***сдвиг значения температуры***, позволяющая в радиационной задаче специальной командой задавать разность между абсолютным нулем и нулем используемой шкалы.

При расчетах в ANSYS должна контролироваться размерность вводимых величин. Информация, помогающая задавать расчетные параметры, содержится в табл. 1.1. В табл. 1.2 указаны форматы файлов, которые создаются ANSYS в процессе вычислений.

Таблица 1.1

Параметры, используемые в тепловом анализе

	Параметр	Размерность	Обозначение в ANSYS
1	Температура	К (°C)	TEMP
2	Координаты, длина	м	X,Y,Z
3	Сила	Н	
4	Время	с	TIME
5	Масса	кг	
6	Давление	Па	PRESSURE

Окончание табл. 1.1

	Параметр	Размерность	Обозначение в ANSYS
7	Давление, заданное на поверхность	Па	PRES
8	Скорость	м/с	VELOCITY
9	Ускорение	м/с ²	
10	Плотность	кг/м ³	DENS
11	Напряжение	Па	
12	Модуль Юнга	Па	
13	Мощность	Вт	
14	Теплопроводность	Вт/(м·К)	KXX
15	Плотность теплового потока	Вт/м ²	HFLUX
16	Теплоемкость	Дж/(кг·К)	C
17	Тепловой поток	Вт	HEAT
18	Объемное энерговыделение	Вт/м ³	HGEN
19	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	Вт/(м ² ·К)	CONV
20	Динамическая вязкость	кг/(м·с)	μ
21	Кинематическая вязкость	м ² /с	
22	Степень черноты	-	ε
23	Расход жидкости		FLOW
24	Скорость (flotran)		VELOCITY
25	Тепловое излучение		RAD
26	Температура жидкости вычисляемая		TFLUID
27	Температура поверхности элемента		TS
28	Плотности тепловых потоков в узлах		TFX,TFY,TFZ
29	Градиенты температуры в узлах		TGX,TGY,TGZ
30	Смещения по X и Y		UX,UY
31	Скорость по X,Y,Z		VX,VY,VZ
32	Относительное давление		PREZ
33	Кинетическая энергия турбулентности		ENKE
34	Коэффициент диссипации турбулентности		ENDS
35	Эффективная вязкость (с учетом турбулентн.)		EVIS
36	Эффективная теплопроводность (с учетом турбулентности)		ECON
37	Коэффициент турбулентной вязкости		CMUV
38	Плотность теплового потока на внешней поверхности		HFLU
39	Коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности		HFLM
40	Плотность теплового потока излучения		RDEL
41	Площадь	м ²	A

Виды и форматы файлов, создаваемых ANSYS

Назначение файла	Формат имени файла
Log файл для полной записи программы	Jobname.log
Файл базы данных	Jobname.db
Файл резервной базы данных	Jobname.dbb
Файл результатов термического анализа	Jobname.rth
Файл результатов гидродинамического анализа	Jobname.rfl
Файл результатов конструкционного анализа	Jobname.rst
Файл результатов электромагнитного анализа	Jobname.rmg
Файл ошибок	Jobname.err
Файл вывода	Jobname.out
Файл пошаговой нагрузки	Jobname.sn
Файл графики	Jobname.grph
Файл матрицы элементов	Jobname.emat
Файл с элементами сетки	Jobname.elm
Файл с узлами сетки	Jobname.nod
Файл-библиотека с пользовательскими свойствами материалов	Jobname.SI_MPL

1.3. Особенности решения задач в программе FLOTRAN

Программа FLOTRAN позволяет моделировать двух- и трехмерные течения, ламинарные и турбулентные, сжимаемые и несжимаемые для естественной и вынужденной конвекции. В ней используется до 8 моделей турбулентности: стандартная К-ε, четыре расширения стандартной К-ε модели, турбулентная модель нулевого уравнения, модель К-omega и модель SST. Используются модели вязкости Ньютона и неньютоновские. При активизации модели многокомпонентной среды отслеживается поведение до шести разных компонент основной жидкости. В расчетах могут учитываться: фильтрация, распределенные источники, жидкости со свободной поверхностью с учетом поверхностного натяжения.

При решении задачи объектом, для которого создается геометрическая модель, является объем, через который движется среда. У среды должны быть заданы плотность и вязкость. Поточковые задачи бывают внутренние и внешние (рис. 1.1). У внутренних потоков течение жидкости ограничивают стенки или плоскость симметрии, а также границы входа и выхода. У внешних потоков граничные условия обычно задают скорости и давление удаленного поля.

Гидродинамический анализ используется для определения параметров движения жидкой среды, таких как перепад давления, распределение скоростей, направление течения, подъемная сила и лобовое сопротивление, влияние нагрева и охлаждения. Для полностью связанной задачи общая система уравнений решается одновременно для всех узловых неизвестных: скорости потока, давления и температуры соответственно. Для сокращения времени на расчеты используется метод раздельного решения, при котором каждая из основных переменных определяется последовательно за счет выделения из общей системы изолированных систем уравнений.

Расчетный анализ может использоваться для определения взаимодействия движущихся потоков и жестких поверхностей конструкции, определения механических и тепловых нагрузок, обусловленных движением среды; может определять деформации конструктивных элементов; может проводиться численный анализ влияния на параметры потока препятствий, затрудняющих движение среды, или ускоряющих поток (например, вентиляторы).

Figure 3.1: Internal Flow

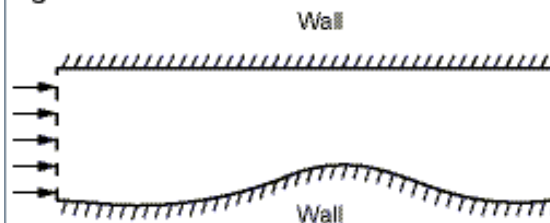


Figure 3.2: External Flow

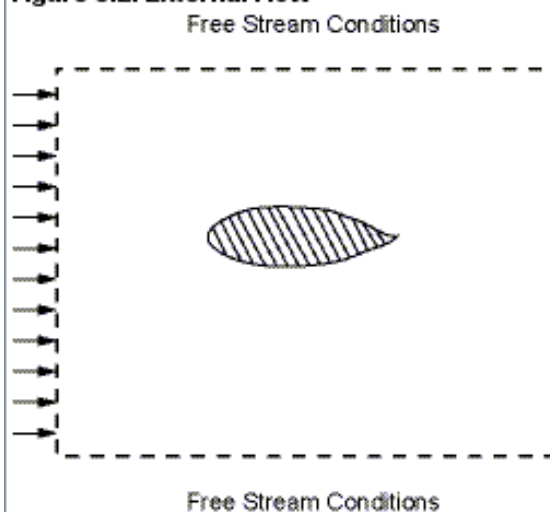


Рис. 1.1. Схемы потоков

1.3.1. Основные уравнения FLOTTRAN (для несжимаемой жидкости)

В описании программы *ANSYS Multiphysics* уравнения записаны в системе обозначений, отличающейся от использованной в первом разделе. Уравнение энергии в ANSYS

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \nabla \cdot (\rho C_p T \mathbf{v}) = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q_v, \quad (1.19)$$

где t – время; ρ – объемная плотность; C_p – теплоемкость; T – температура; $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{k}$ – векторный дифференциальный оператор набла; $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$ – единичные векторы; \mathbf{v} – вектор скорости; K – коэффициент теплопроводности; Q_v – мощность объемного источника тепла.

Уравнение движения

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} P + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\mu_e \nabla \mathbf{v}). \quad (1.20)$$

Здесь P – давление; μ_e – эффективная вязкость, для ламинарной жидкости совпадает с динамической вязкостью μ , при турбулентном режиме определяется по расчетным выражениям модели турбулентности.

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \rho \mathbf{v} = 0. \quad (1.21)$$

Здесь скорость изменения плотности заменяется на скорость изменения давления

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t}. \quad (1.22)$$

Связь плотности и давления

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = \frac{1}{\beta}. \quad (1.23)$$

Если среда несжимаемая, то β считается равным 10^{15} .

С детальной постановкой задачи можно познакомиться в разделе HELP программы ANSYS.

1.3.2. Модели турбулентности, используемые в программе ANSYS

1.3.2.1. Модели с детальным описанием процессов

В расчетах турбулентности используются представления аналогии Рейнольдса о существовании дополнительного турбулентного переноса тепла и количества движения. В соответствии с ними влияние турбулентности на движение среды учитывается с помощью дополнительной (турбулентной) вязкости μ_T , возникающей в потоке $\mu_e = \mu_T + \mu$. Аналогично вязкости определяется дополнительная (турбулентная) теплопроводность среды λ_T , учитывающая дополнительный перенос тепла вследствие турбулентности.

Связь между коэффициентами вязкости и теплопроводности в ламинарном потоке учитывает число Прандтля. При тепловом анализе обычно используют понятие о турбулентном числе Прандтля, которое устанавливает связь между турбулентными коэффициентами вязкости и теплопроводности $Pr_T = \mu_T c_p / \lambda_T$ [8,9]. Для многих течений жидкостей и газов считают $Pr_T \approx 0,9$. На самом деле это значение справедливо для внутренней области пограничного слоя, оно снижается до 0,5 во внешней области и зависит от геометрии потока. При заданном турбулентном числе Прандтля находят только один из коэффициентов (турбулентную вязкость), а турбулентную теплопроводность вычисляют через Pr_T .

Относительно новыми подходами к моделированию турбулентных течений является [10-13] использование прямого численного моделирования (DNS – Direct Numerical Simulation) и моделирования крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation). В DNS решаются полные нестационарные уравнения Навье–Стокса без использования каких-либо специальных моделей турбулентности, т.е. особенности течения учитываются без дополнительного моделирования. Решение требует настолько подробных сеток и малых шагов расчета по времени, для этого нужна настолько большая

компьютерная память, что в настоящее время расчеты могут быть реализованы только при малых числах Рейнольдса.

Большие вычислительные затраты необходимы и для полупрямых методов моделирования, например, для метода крупных вихрей (LES). В нем «используются специальные фильтры для вывода уравнений разрешенных масштабов»³. Исключается из расчета мелкомасштабная турбулентность, которая «слабее» и содержит меньше рейнольдсовских напряжений, чем крупномасштабная вихревая структура. «Главная проблема в моделировании крупных вихрей состоит в том, что вблизи стенки все вихри настолько малы, что размеры энергоемких и диссипирующих вихрей совпадают. Это, конечно, создает серьезные ограничения по числу Рейнольдса для LES». Для развития метода опробовано значительное число фильтров, граничных условий, расчетных схем. Показано, что LES представляет собой перспективное направление в развитии методов расчета турбулентных течений.

На практике для описания трехмерных турбулентных течений часто используют осредненные по времени уравнения Навье–Стокса (RANS – Reynolds Averaged Navier–Stokes equation). При этом основной задачей становится определение коэффициента турбулентной вязкости. Величина μ_t может сильно отличаться в разных точках пространства и зависеть от типа течения.

Модели турбулентности подразделяют по числу уравнений, используемых в дополнение к уравнениям Навье–Стокса: модели «ноль уравнений» (алгебраические), «одного уравнения» (например, модель Спаларта–Аллмараса), «двух уравнений» (k - ε и k - ω модели).

Среди моделей турбулентности различают низкорейнольдсовские (Low-Reynolds) и высокорейнольдсовские (High-Reynolds). Это связано с тем, что модели с разной степенью адекватности учитывают процессы, происходящие в пристеночной области. Вблизи стенок силы инерции меньше сил вязкости (локальное значение Re мало) и течение не полностью турбулентно. Низкорейнольдсовские модели могут без привлечения дополнительных условий, но при наличии качественной сетки адекватно моделировать процессы вблизи стенок, а высокорейнольдсовские не могут.

³ Фразы в кавычках приняты автором в терминологии описаний фирмы ANSYS или рекламных материалов пакета программ

1.3.2.2. Алгебраические модели

Используют алгебраические соотношения для связи турбулентной вязкости с осредненными величинами и геометрическими характеристиками. Модели просты, их легко настроить на учет специфики рассматриваемых течений, они экономичны по вычислительным ресурсам. Но модели недостаточно полно отражают механизм процесса, и ожидать от них высокой точности результатов не следует.

М о д е л ь п у т и с м е ш е н и я Л. П р а н д т л я

В модели считается, что характерный масштаб пульсаций скорости равен градиенту осредненной скорости, умноженному на характерный масштаб длины l_m , который Прандтль назвал путем смешения. Выражение для кинематической турбулентной вязкости имеет вид

$$\nu_T = l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right|. \quad (1.24)$$

На основании эмпирических данных считается $l_m = ky$, где $k = 0,4-0,42$ – постоянная Кармана (известны более сложные зависимости $l_m(y)$, учитывающие влияние расстояния до стенки и других параметров [14]).

Модель работает при расчете сдвиговых слоев, но в иных случаях может требовать коррекции. Например, там, где градиент скорости равен нулю, вязкость $\nu_T = 0$, что не соответствует действительности.

Часто используется *модель Прандтля, усовершенствованная Ван-Дристом* [8]. В соответствии с ней

$$\nu_T = L^2 f_{V-D} \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|, \quad (1.25)$$

где L – масштаб турбулентности (длина пути смешения), рассчитывается по одной из формул

$$L/\delta = 0,4y/\delta - 0,5(y/\delta)^2 + 0,2(y/\delta)^3, \text{ или} \quad (1.26)$$

$$L/\delta = 0,08\left[1 - (y/\delta)^5\right];$$

$f_{V-D} = [1 - \exp(-y_+/A)]^2$ – поправочный множитель, распространяющий модель пути смешения на вязкий подслой ($A = 26$ – постоянная Ван-Дрифта; $y_+ = yu_\tau/\nu$ – безразмерная координата; $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ – динамическая скорость; τ_w – касательное напряжение по стенке); δ – толщина гидродинамического пограничного слоя, в котором скорость меняется от нуля на стенке до значения скорости невозмущенного потока u_0 (в практических расчетах границей пограничного слоя считают поверхность, в которой $u = (0,99-0,995) \times u_0$). Формулы для L учитывают, что у стенки масштаб турбулентности меняется линейно, а во внешней части пограничного слоя остается приблизительно постоянным.

М о д е л ь Д е н и с о в а – Ш к л я р а

Данная модель – одна из самых простых алгебраических моделей [15,16]. Она позволяет приближенно учесть турбулентность в задачах и программах, не поддерживающих специальных алгоритмов учета турбулентности. В ANSYS модель может использоваться для оценочных вычислений наряду с более сложными моделями турбулентности.

Для расчетов поток газа условно разбивается на характерные зоны: циркуляционную зону, зону настильного обтекания потоком стенки и др. Считается, что в каждой из этих зон коэффициенты теплопроводности среды постоянны и равны некоторым эффективным величинам $\lambda_{эф}$, при которых результирующий конвективный теплообмен газа со стенками соответствует условиям турбулентного движения среды в канале. Для каждой характерной зоны записывается равенство

$$\alpha(\bar{T}_Г - T_{ст}) = \frac{\lambda_{эф}}{\delta}(\bar{T}_Г - T_{ст}), \quad (1.27)$$

где $\bar{T}_Г$ – среднерасходная температура газа в зоне, прилегающей к стенке с температурой $T_{СТ}$; $\frac{\lambda_{эф}}{\delta}$ – термическая проводимость газа в зоне.

При ламинарном режиме движения среды $\lambda_{эф}$ равен коэффициенту молекулярной теплопроводности λ_M . Относительный коэффициент теплопроводности A при использовании чисел подобия Нуссельта Nu

$$A = \frac{\lambda_{эф}}{\lambda_M} = \frac{Nu}{Nu_{ЛАМ}}, \quad (1.28)$$

где $Nu_{ЛАМ}$ – число Нуссельта при ламинарном движении среды. Отношения чисел Нуссельта для каждой характерной зоны рассчитываются по формулам для ламинарного и турбулентного потоков в камере по средним значениям скорости потока в пределах зон. Более детальное описание процесса возможно при использовании локальных значений Nu , определенных по методу работы [17].

Значения турбулентных коэффициентов вязкости для решения газодинамической задачи определяют по турбулентному значению коэффициента теплопроводности, используя понятие о турбулентном числе Прандтля.

Модель турбулентности Z E M (Zero Equation Model)

Простая модель турбулентной вязкости, использующая эмпирическую формулу

$$\mu_T = \rho L_S^2 \sqrt{\Phi}, \quad (1.29)$$

где

$$L_S = \begin{cases} L_X, & \text{если } L_X > 0, \\ \min \left\{ 0,4L_n \right\}, & \text{если } L_X \leq 0, \end{cases} \quad (1.30)$$

$$\Phi = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} - \text{тензор вязкой диссипации};$$

L_X – масштаб длины; L_n – кратчайшее расстояние от узла до ближайшей границы; L_S – характеристический масштаб длины (наибольшее значение L_n).

Модель имеет «небольшое физическое основание» и потому не рекомендуется для проведения точных расчетов.

1.3.2.3. Модели одного уравнения

Турбулентность описывается с помощью одной переменной, для которой составлено одно дифференциальное уравнение. Остальные характеристики турбулентности связываются с этой переменной при помощи алгебраических и иных уравнений.

Модель Спаларта - Аллмараса

Модель относится к числу низкорейнольдсовых. Она создавалась для задач внешней дозвуковой аэродинамики [18]. После введения ряда поправок модель «стала удовлетворительной» для многих инженерных приложений, в частности, для течений в камерах с зонами циркуляции. Расчетные зависимости имеют вид:

$\nu_T = \tilde{\nu} f_{V1}$ – кинематическая турбулентная вязкость;

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \bar{v}_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1} \tilde{S} \tilde{\nu} - c_{w1} f_w \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \frac{d}{dx_k} \left[(\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \right] + \frac{c_{b2}}{\sigma} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \quad (1.31)$$

– уравнение турбулентной вязкости, где d – расстояние до ближайшей стенки. Величины $c_{b1}, c_{b2}, \sigma, c_{w1}, f_w, \tilde{S}$ определяются из вспомогательных соотношений и коэффициентов замыкания.

Модели с одним дифференциальным уравнением применимы для описания турбулентных течений с учетом сжимаемости, кривизны линий тока и отрыва потока. Однако используются они, как правило, для потоков с простой конфигурацией.

1.3.2.4. Модели двух уравнений

Наибольшее распространение получили k - ε и k - ω модели и их модификации. В k - ε моделях, которые дают неплохие результаты для

подавляющего большинства турбулентных течений, эффективная вязкость μ_T вычисляется как функция параметров турбулентности – кинетической энергии и скорости ее диссипации

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1.32)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия; ε – турбулентная энергия диссипации. Двухпараметрические модели имеют общий недостаток: они считают турбулентную вязкость изотропной, что не всегда справедливо для сложных течений.

В стандартной модели k - ε и в модели RNG (Re-normalized Group Model) – константа, в остальных моделях задается формулами. Для определения k и ε должны быть решены два дополнительных уравнения.

Стандартная k - ε модель

Для стандартной k - ε модели дополнительные уравнения имеют вид: уравнение турбулентной кинетической энергии

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho k \nabla v = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \nabla k \right) + \mu_T \Phi - \rho \varepsilon + \frac{C_4 \beta \mu_T}{\sigma_t} (g \cdot \nabla T), \quad (1.33)$$

уравнение скорости диссипации

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \varepsilon \nabla v = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \mu_T \frac{\varepsilon}{k} \Phi - C_{2\rho} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu (1 - C_3) \beta \rho k}{\sigma_t} (g \cdot \nabla T). \quad (1.34)$$

Значения коэффициентов в модели получены в результате подгонки результатов под экспериментальные данные и заданы в программе по умолчанию. Модель относится к числу высокорейнольдсовых.

Модель R N G (Re- normalized Group Model)

RNG k - ε модель разработана на основе статистических методов. Она улучшает определение констант уравнения для ε . В результате величины становятся приемлемыми для низкорейнольдсовых течений.

Для этого, сохраняя расчетные выражения стандартной модели, величину $C_{1\varepsilon}$ определяют по

$$C_{1\varepsilon} = 1,42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_\infty} \right)}{1 + \beta_\infty \eta^3}. \quad (1.35)$$

М о д е л и: N K E (New KE Model), G I R (Girimaji Model), S Z L (Shih, Zhu, Limley Model)

Данные модели представляют собой варианты k - ε модели, отличающиеся способом определения коэффициентов.

С т а н д а р т н а я k - ω м о д е л ь (Standard k-omega Model)

В модели турбулентности используется уравнение для турбулентной частоты ω вместо уравнения для диссипации энергии. Данное уравнение лучше описывает процесс около поверхности стенок. Поэтому в потоках с большими градиентами давлений более точно предсказывается масштаб турбулентности. Модель низкорейнольдсовая. Выражение для турбулентной вязкости имеет вид

$$\mu_T = \frac{\rho k}{\omega}. \quad (1.36)$$

Результаты моделирования у k - ω модели более точно соответствуют экспериментальным данным в пристеночной области, чем у k - ε модели. Однако расчеты для течений вне пограничного слоя могут давать результаты с большими погрешностями. Для корректного решения в пристеночных слоях нужна подробная сетка.

S S T k - ω м о д е л ь М е н т е р а (shear-stress transport - перенос касательных напряжений)

Ментер объединил k - ε и k - ω модели турбулентности, используя k - ω - в пристеночных областях, а k - ε - в области развитой турбулентности. Для этого уравнение k - ω модели умножили на

функцию-переключатель моделей $F1$, а сложенные с ними преобразованные для общего единообразия уравнения k - ε модели на функцию $(1-F1)$. Функция $F1$ равна единице вблизи стенки и нулю вдали от поверхности. Получилась низкорейнольдсовая модель, объединяющая достоинства двух моделей.

ν^2 - f модель турбулентности

В низкорейнольдсовой модели, сходной со стандартной k - ε моделью, пытаются учесть неізотропные эффекты. Для этого добавлено уравнение для квадрата пульсаций поперечной скорости ν^2 и специального релаксационного фактора f . Модель содержит четыре уравнения.

Среди прочих моделей отметим *модель турбулентности Reynolds Stress*, которую применяют при расчете потоков с сильной анизотропией и при расчете неравновесных эффектов. Решаемые уравнения модели сложны, поэтому при их решении плохая сходимость. *Модель турбулентности Eddy Viscosity* предназначена для расчетов с незначительной турбулентностью, которая непрерывно формируется и рассеивается.

1.3.2.5. Моделирование течений вблизи стенки

Низкорейнольдсовые модели способны моделировать процессы в пристеночных областях, но для этого им нужны качественные сетки и малый шаг расчета по времени. Высокореинольдсовые модели могут использоваться в двухслойных моделях, как это сделано в SST k - ω модели Ментера. В работе [19] используемая k - ε модель в пристеночной области была заменена моделью Прандтля с последующей «сшивкой» моделей. Такой подход может оказаться проблемным для использования в сложных течениях.

Обычно для моделирования течений высокорейнольдсовыми моделями используют *метод пристеночных функций* [18]. При этом расчет основной части потока проводится с использованием турбулентной модели, а расчет части потока, прилегающей к стенке,

использует упрощенную методику. Пристеночная область течения разбивают на три (или больше [8]) характерные области.

1. В непосредственной близости от стенки выделяется вязкий подслой, в котором вязкие напряжения доминируют над рейнольдсовыми, а тепло передается теплопроводностью. Следовательно, можно пренебречь турбулентной теплопроводностью λ_T и турбулентной вязкостью μ_T . Скорость потока линейно зависит от расстояния от стенки: $u^+ = y^+$, где $u^+ = \frac{\bar{u}}{u_T}$ – безразмерная скорость;

$y^+ = \frac{u_T y}{\nu}$ – безразмерное расстояние от стенки; $u_T = \sqrt{\frac{\sigma_w}{\rho}}$ –

динамическая скорость.

2. Промежуточный слой, в котором вязкие и рейнольдсовы напряжения соизмеримы по величине. «Сшивая» распределения скорости в слое 1 и следующем слое 3, получили распределение

$$u^+ = 5 \ln y^+ + 3,05. \quad (1.37)$$

3. Логарифмический слой, в котором рейнольдсовы напряжения намного больше вязких. Здесь можно пренебречь молекулярным переносом тепла и импульса; распределение скорости подчиняется логарифмическому закону

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(Ey^+), \quad (1.38)$$

где k – постоянная Кармана; E – постоянная, определяющая степень шероховатости (для гладкой стенки экспериментально получено $E=8,8$).

Область, описываемая пристеночными функциями, занимает около 20 % толщины пограничного слоя. В пристеночной области профиль скорости слабо зависит от числа Рейнольдса, продольного градиента давления и других внешних условий.

В разбиении пристеночной области на слои возможны варианты. Например, в [8] подробно рассмотрено решение задачи теплообмена в турбулентном потоке газов, пристеночная область которого разбита на четыре части.

Глава 2

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ В ПАКЕТЕ ANSYS Multiphysics

2.1. Графический интерфейс пользователя

Управление программой производится с помощью системы меню, называемой графическим интерфейсом пользователя (Graphical User Interface – GUI). Графический интерфейс, показанный на рис.2.1, включает: меню утилит (Utility Menu); главное меню (Main Menu); графическое окно; стандартную панель; окно ввода команд; панель инструментов; панель управления видами; дополнительную панель; строку состояния (внизу экрана).

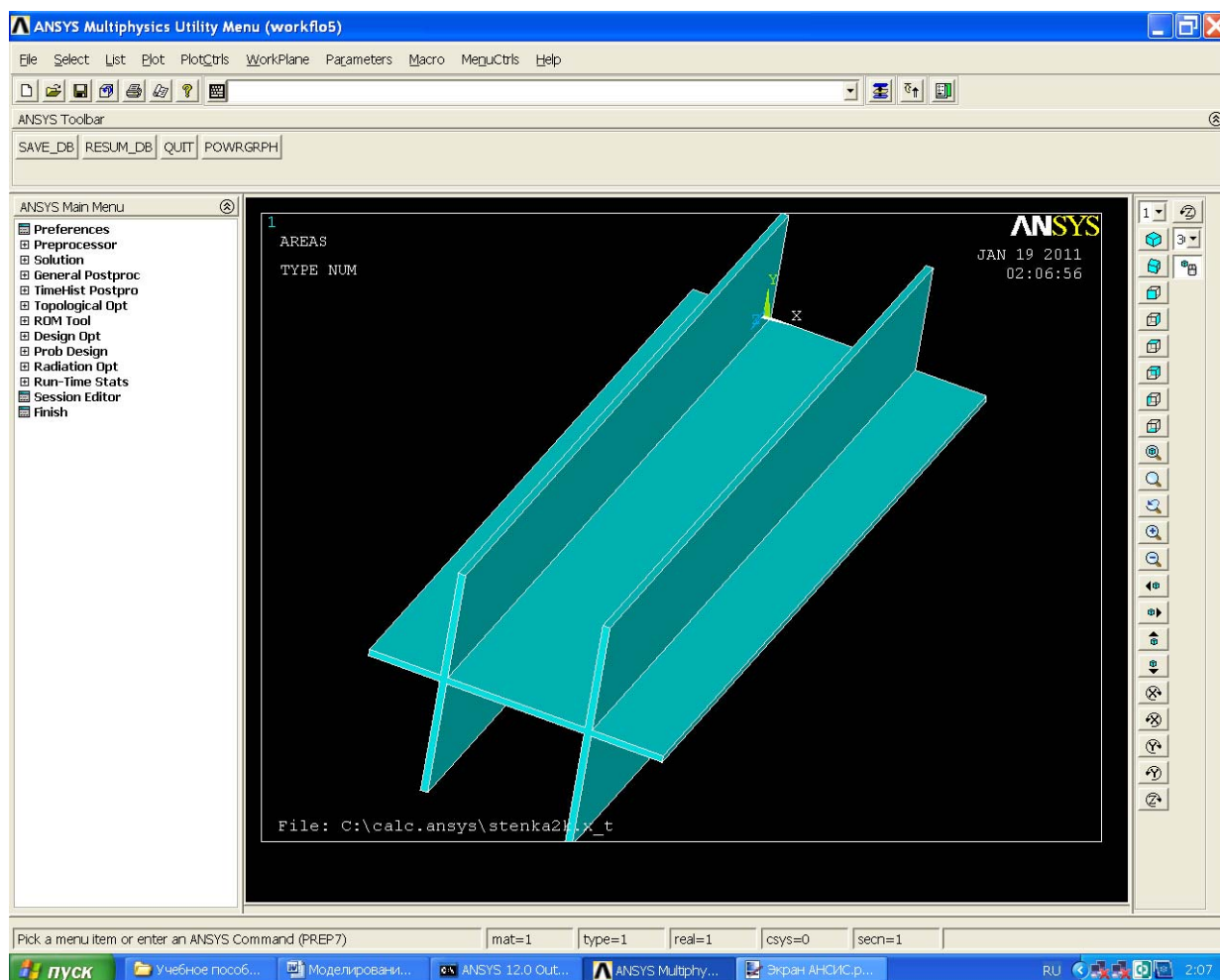


Рис. 2.1. Интерфейс программы ANSYS Multiphysics

Графическое окно – область, в которой отображаются графические объекты. Это самое большое окно на экране.

Меню утилит, показанное на рис. 2.2, содержит пункты:



Рис. 2.2. Меню утилит

File – работа с файлами и базами данных (сохранение, чтение, очистка, импорт и экспорт моделей, выход из программы);

Select – вызов и создание компонентов модели;

List – функции использования набора объектов и создания компонентов;

Plot – вывод на экран элементов модели (линий, поверхностей, объемов...);

PlotCtrls –команды, управляющие графическим выводом;

WorkPlane – создание и управление положением рабочей плоскости;

Parameters –команды для работы с параметрами модели;

Macro – команды для создания макросов;

MenuCtrls –вызов и закрытие различных окон системы;

Help – вызов на экран справочной информации о системе.

Главное меню, показанное на рис. 2.3, управляет работой препроцессора, решателя и постпроцессора. Имеет древовидную структуру, в которой щелчок по знаку «+» в названиях разделов меню вызывает опции этих разделов. Для перехода к выполнению операций следующего раздела необходимо закончить выполнение операций предыдущего раздела.

Меню в том числе содержит следующие пункты:

Preferences – определяется структура главного меню в зависимости от типа решаемой задачи;

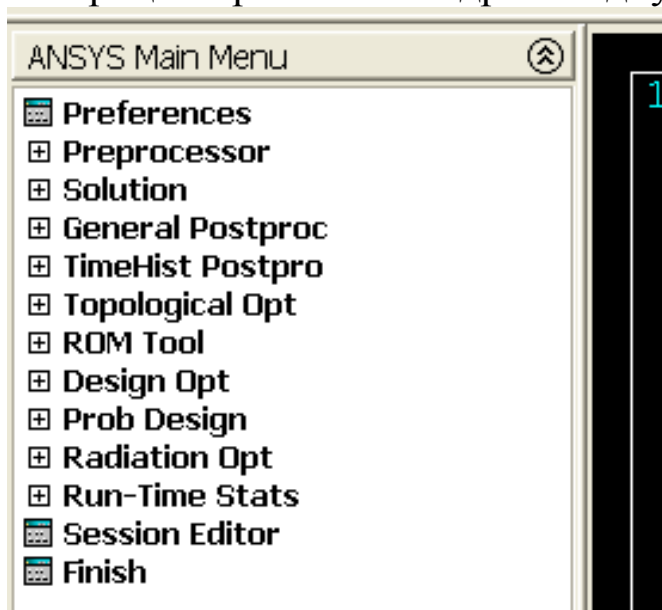


Рис.2.3. Главное меню

Preprocessor - открывает меню, содержащее команды препроцессора;
Solution - открывает меню команд настройки и выполнения решения;
General Postproc - содержит команды, отвечающие за вывод на экран результатов расчета;
TimeHist Postpro - содержит команды, отвечающие за вывод на экран результатов расчета многошаговых задач;
Design Opt - осуществляет вход и содержит функции модуля оптимизации модели;
Radiation Opt - содержит функции модуля определения коэффициентов излучения;
Session Editor - вызывает редактора сеанса;
Finish - осуществляет выход из текущего модуля и переход на начальный уровень.

Окно ввода команд показано на средней части изображения рис. 2.4. Позволяет вводить текстовые команды и ответы на запросы системы.



Рис. 2.4. Стандартная панель, окно ввода команд и дополнительная панель

Стандартная панель (рис. 2.4) – выполняет функции, в числе которых:

New Analysis – сохранение и очистка информации текущего расчета, начало нового расчета;
Open ANSYS File – чтение базы данных или исходного файла;
Save Analysis – сохранение текущей модели в файле базы данных;
Pan-Zoom-Rotate – вызов диалоговой панели;
Image Capture – вызов средств сохранения изображения;
Report Generator – вызов средств создания отчета;
Context ANSYS Help – вызов оглавления справки ANSYS;
 На дополнительной панели:
Raise Hidden – перевод скрытых окон на первый план приложения;
Reset Picking; Contact Manager.

Панель инструментов (рис. 2.5) предоставляет пользователю возможность создавать кнопки с текстом и кнопки для немедленного доступа к часто исполняемым командам. Панель может вместить до 200 кнопок.

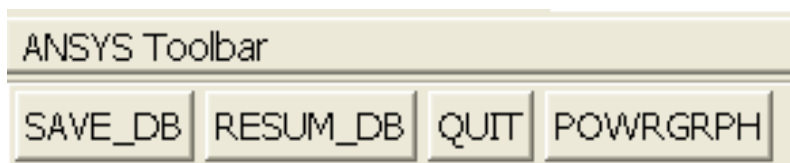


Рис. 2.5. Панель инструментов

Окно вывода сообщений комплекса обычно расположено позади остальных средств GUI, но может быть перемещено на передний план. Содержит информацию комплекса: сообщения, предупреждения, ошибки, отклики команд.

Панель управления видами показана на рис. 2.6. Позволяет изменять расположение, размеры, способ изображения геометрической модели. Символика на кнопках модели делает интуитивно понятным их назначение.

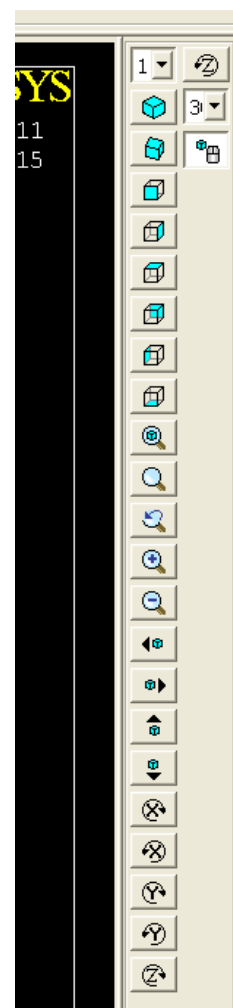


Рис. 2.6.
Панель
управления
видами

2.2. Этапы препроцессорной подготовки решения

2.2.1. Действия до начала решения задачи

Для расчетов в ANSYS должна быть заранее создана рабочая директория, путь к которой содержит только латинские символы.

Например, можно создать директорию: **C:\calc.ansys**. Если геометрическая модель создана в другой программе, то файл с импортируемой геометрической моделью объекта должен быть помещен в папку calc.ansys. Например, в одном из расчетов, описанных ниже, геометрическая модель теплопередающей стенки рекуператора была построена в программе КОМПАС-3D и сохранена

в формате Parasolid в файле `stenkalk.x_t`, затем файл поместили в папку `calc.ansys`.

2.2.2. Начало работы

Первый запуск задачи удобно проводить в приложении **Product Launcher** (англ. *Launcher* – пусковое устройство). Выполнить:

ПУСК→Все программы→ANSYS 12.0→Mechanical APDL Product Launcher→

Появилось окно Product Launcher с открытой закладкой **File Management** (рис. 2.7). В текстовое поле закладки нужно ввести

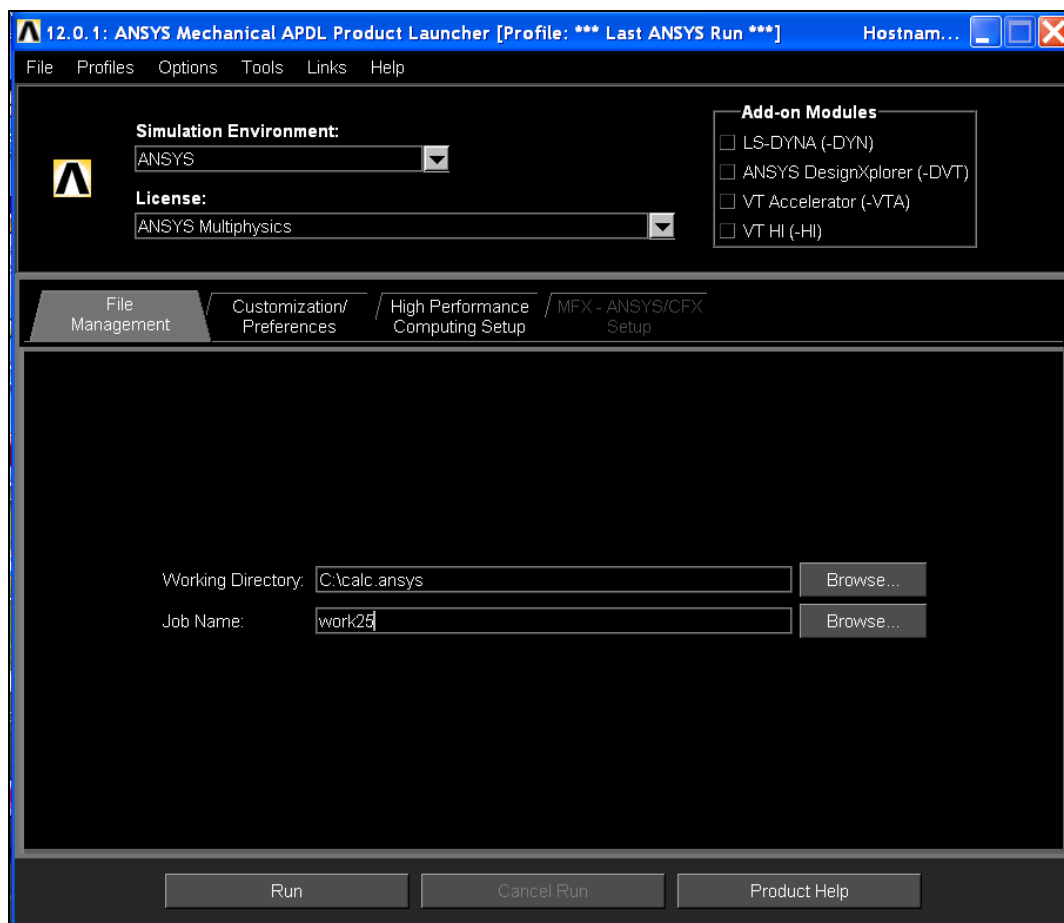


Рис. 2.7. Окно Product Launcher

ввести имя рабочей папки (**Working Directory**). В данном случае это **C:\calc.ansys**. В поле **Job Name** ввести имя задачи (модели). Допустим, это имя **work25**. Если нужно обратиться к задаче,

решавшейся ранее, то ее имя нужно выбрать из списка, появившегося после нажатия кнопки **Browse**.

Рассмотренные выше примеры не требуют перехода к закладке **Customization/Preferences** для ввода информации, поэтому следует нажать кнопку **Run** внизу. При необходимости можно получить дополнительную информацию в разделе **Help**.

Примечание. Если настройки программы не требуются, то ее запуск можно выполнить командами:

ПУСК→Все программы→ANSYS 12.0→Mechanical APDL (ANSYS)→.

2.2.3. Настройка графического интерфейса

В главном меню (на экране слева) выбрать пункт **Preferences**. Появляется окно, показанное на рис. 2.8. Выбрать инженерную дисциплину **Thermal** – тепловая задача, нажать кнопку **OK**. Далее

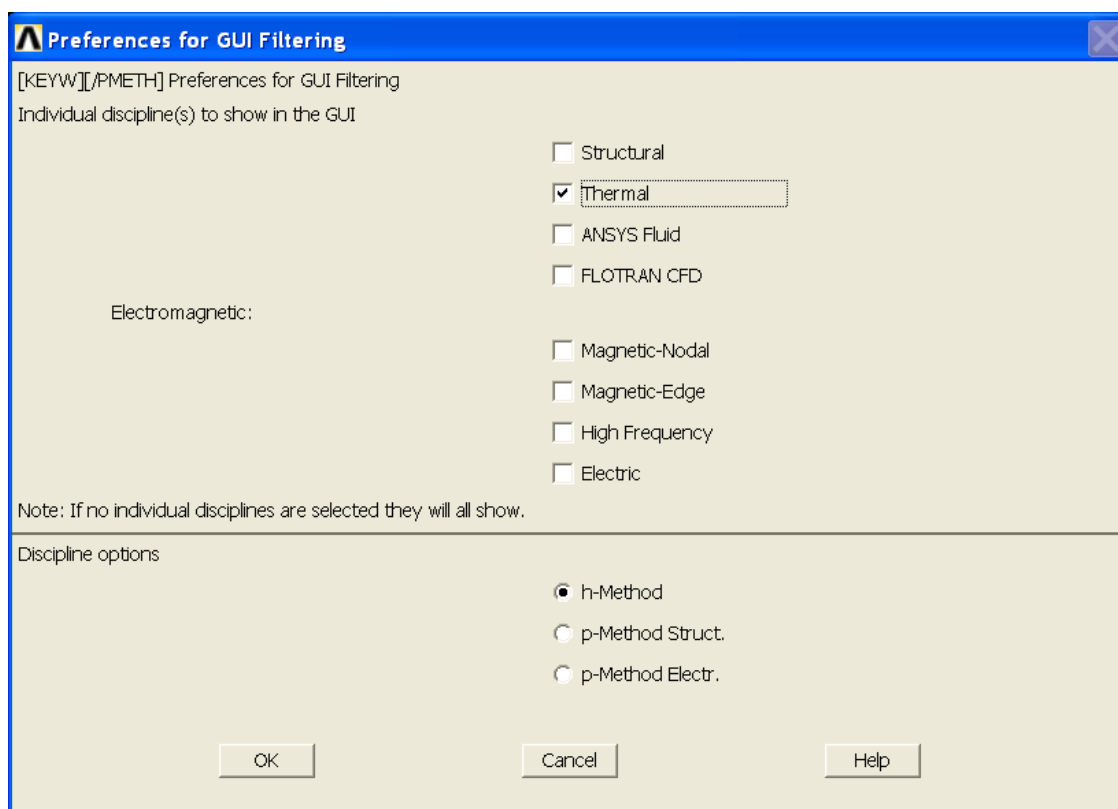


Рис. 2.8. Окно настроек GUI

такие последовательности действий будут записываться сокращенно

MAIN MENU→PREFERENCES→THERMAL→OK.

Примечание. При ином выборе настроек структура меню задачи будет перестраиваться для решения одной из следующих задач: Structural – конструкционный анализ, ANSYS Fluid – анализ течения жидкостей кодом ANSYS, FLOTRAN CFD – анализ течения жидкостей кодом FLOTRAN CFD и др.

Программы ANSYS Multiphysics могут выполняться в двух режимах: пакетном и интерактивном. **Пакетный режим** (Commands) – это последовательность команд, выполняющих определенные функции. Типичная команда содержит имя команды, содержащей до 8 символов, и несколько аргументов, разделенных запятой. Режим дает дополнительные возможности профессиональным пользователям, но исследователям «эпизодическим», каких большинство, он неудобен из-за малой наглядности операций.

В данной работе используется только **интерактивный режим** (метод GUI), который записывается последовательностью операций в многооконном графическом интерфейсе пользователя GUI. В любой момент пользователь видит и контролирует действия программы, может вносить исправления повторным выполнением операций.

2.2.4. Задание единиц измерения

Иногда необходимо указать используемую систему единиц. Например для задания системы единиц СИ можно ввести в окно ввода команд выражение, набранное на клавиатуре /UNITS,SI, и для ввода команды нажать **ENTER**.

Пример задания единицы измерения угловых величин в градусах приведен в [7]:

Utility Menu→Parameter→Angular Units→
Выбрать Degrees DEG в поле AFUN →**OK.**

2.2.5. Построение геометрической модели объекта

В программе ANSYS Multiphysics можно использовать три разных способа построения геометрической модели: импорт модели, предварительно построенной другой программой; твердотельное моделирование и непосредственное создание модели в интерактивном режиме работы с программой. Построение модели выполняет собственный специализированный модуль геометрического моделирования.

В специализированном модуле имеется обычный набор таких булевых операций, как сложение, вычитание, пересечение, деление, склеивание и объединение. Формы могут создаваться из геометрических примитивов (сферы, призмы и т.д.). Из примитивов программа автоматически находит связанные с ними поверхности, линии и ключевые точки. Такое построение тел широко распространено в CAD-пакетах, и для простых геометрий особенности пакета быстро усваиваются на интуитивном уровне. Однако сложные геометрические построения требуют продолжительного освоения деталей, которое целесообразно только для профессиональных пользователей пакета.

Вероятно, специалистам, которые работают в ANSYS «не каждый день», удобно использовать модуль программы построения твердотельных моделей тел только простой формы. Модели сложных геометрических объектов лучше строить в универсальном и привычном пользователю CAD-пакете (КОМПАС-3D и др.). Тогда не придется запоминать множество второстепенных особенностей каждого из пакетов, использованных в ANSYS. Способы улучшения модели за счет удаления отверстий, полостей и выпуклостей, исключения мелких подробностей, устранения ненужных зазоров, перекрытий или взаимных внедрений частей объекта при таком подходе не меняются.

В соответствии со сказанным, знакомство с методами построения геометрических моделей в ANSYS по примерам из следующего раздела может оказаться достаточно полным.

Импорт геометрических моделей рассмотрен в следующем разделе на примере. Исходная геометрическая модель была подготовлена в программе КОМПАС - 3D и сохранена в формате **ParaSolid**. Файл с импортируемой геометрической моделью объекта **stenka1k.x_t** помещен в предварительно созданную директорию (папку) **C:\calc.ansys**.

Выполнить действия:

UTILITY MENU→**FILE**→**Import**→**PARA...**

В меню «ANSYS Connection for Parasolid» (рис. 2.9) в окне «Drives» выбрать **диск C**; в окне «Directories» выбрать **C:\calc.ansys**; в окне «File Name» выбрать **stenka1k.x_t**→**Клик**→(имя файла перешло вверх). В окне «Geometry Type» выбрать **Solids Only**→**OK**.

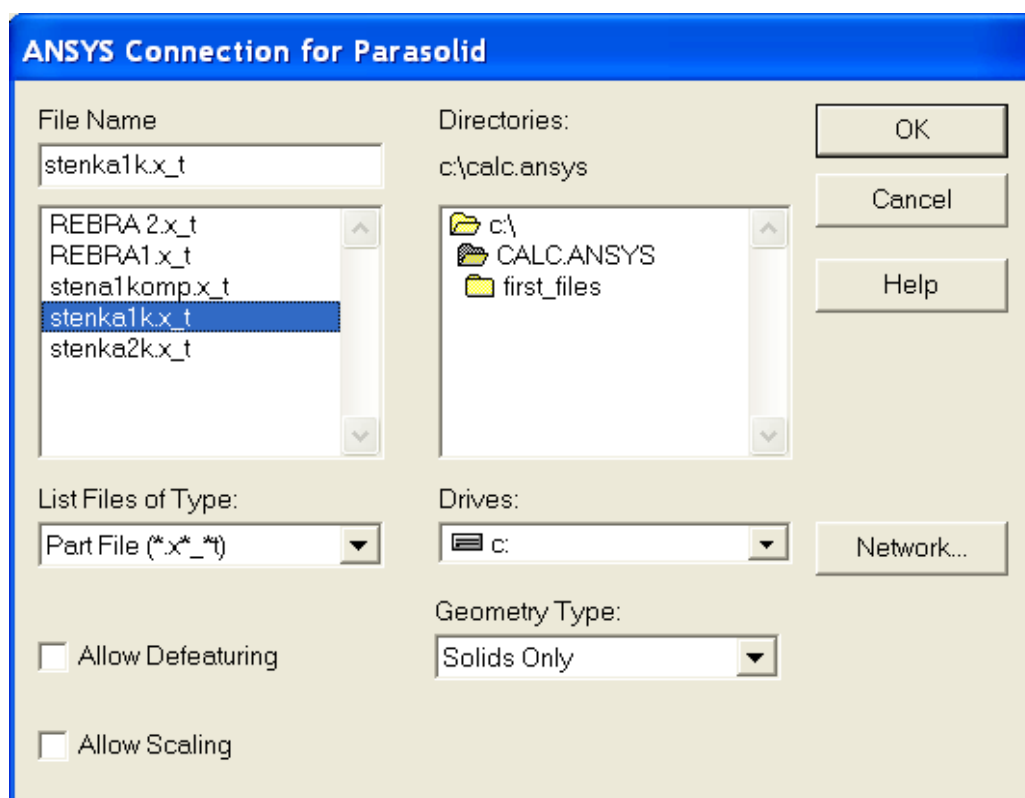


Рис. 2.9. Меню для импорта геометрической модели

В графическом окне появилась модель в виде каркаса (см. рис.2.10,а). Для перехода к полутонному отображению выполнить: **UTILITY MENU**→**PLOTCTRLS**→**STYLE**→**SOLID Model Facets**
В меню « SOLID Model Facets » вместо стиля « Wireframe » установить **Normal Faceting**→**OK**.

Обновить изображение **UTILITY MENU→PLOT→Replot**.
Полученное изображение показано на рис. 2.10,б.

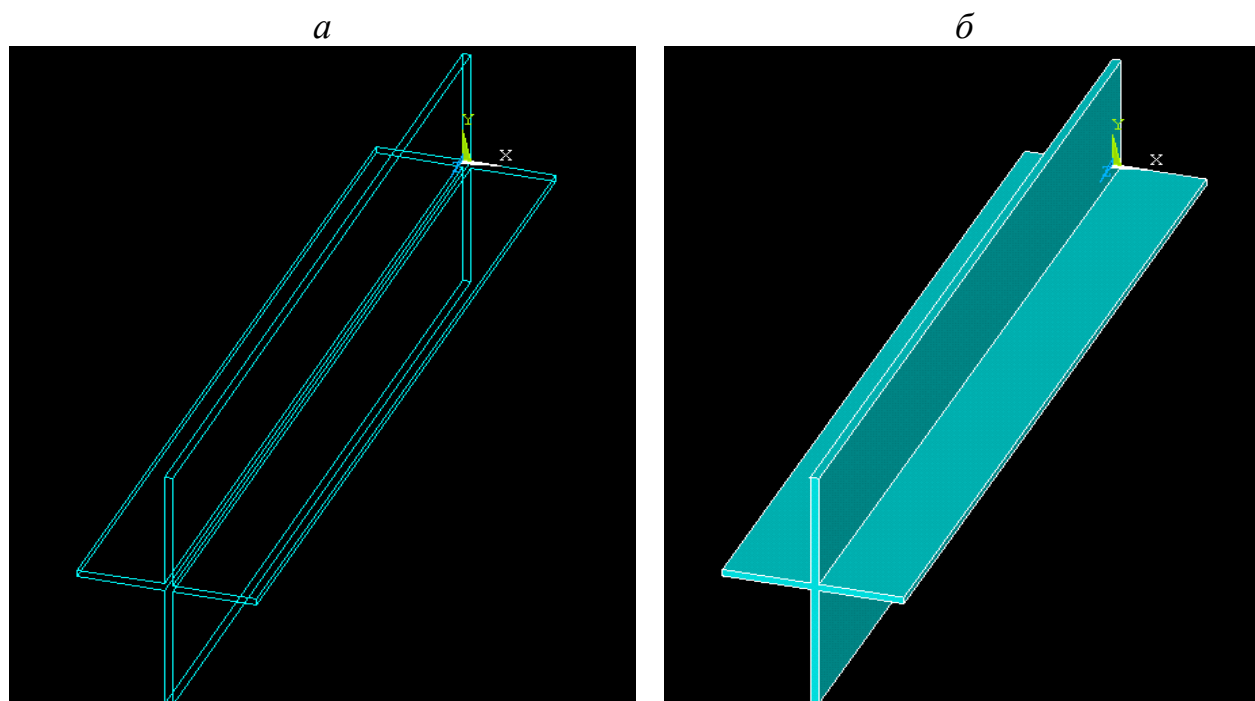


Рис. 2.10. Изменение вида геометрической модели в процессе ее импорта:
a – каркасная модель; *б* – полутонное изображение

2.2.6. Задание свойств материала объектов

Известно, что свойства большинства материалов зависят от температуры, а часто и от направления. В программе ANSYS Multiphysics зависимость свойств от температуры учитывается одним из двух способов. Первый способ табличный, при котором в таблицу вводятся пары значений: свойство – температура. Значение свойства для данной температуры конечного элемента определяется интерполяцией табличных величин. Данные могут записываться в файл для создания библиотеки свойств материалов, используемой и в других видах анализа или другими пользователями.

По второму способу свойства материала задаются полиномом четвертой степени в зависимости от температуры. Этот способ несколько сложнее первого и потому здесь не рассматривается.

В описываемых видах анализа задаются следующие характеристики материала: в тепловом анализе – удельная теплоемкость, энтальпия, коэффициент теплопроводности, коэффициент конвективной теплоотдачи поверхности, степень черноты; в гидроаэромеханике – вязкость, коэффициент теплопроводности, плотность, удельная теплоемкость; в прочностном анализе – модуль упругости (модуль Юнга), коэффициент теплового расширения при заданной температуре, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициент трения, модуль сдвига, коэффициент внутреннего трения.

Для задания свойств выполняются действия:

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MATERIAL PROPS → MATERIAL MODELS

Появляется меню определения свойств материала (рис. 2.11). Выбор позиций в меню производится двойным щелчком мыши (в ANSYS 12 – щелчок одинарный).

=>THERMAL =>CONDUCTIVITY =>ISOTROPIC

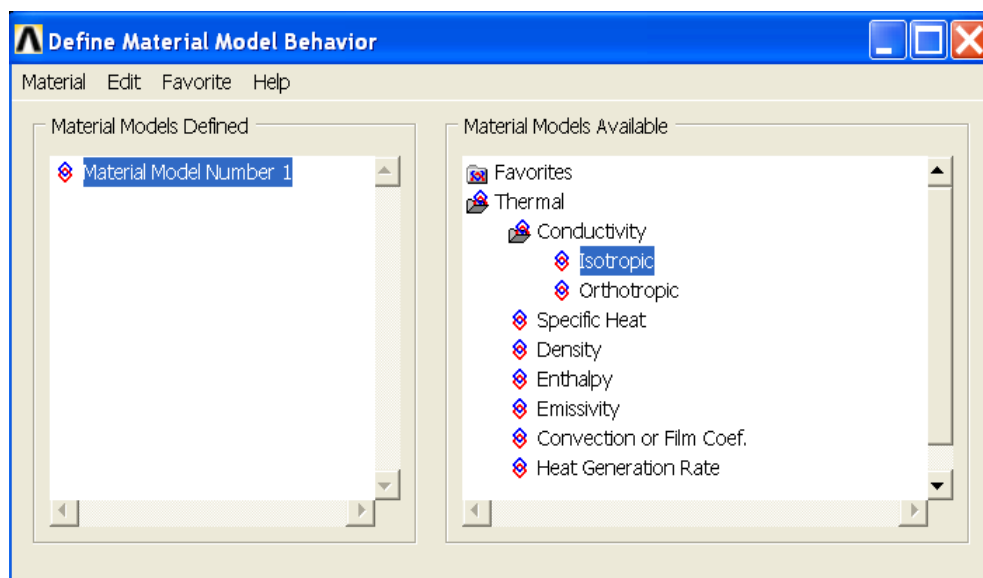


Рис. 2.11. Меню задания свойств материалов

Появляется окно определения теплопроводности (рис.2.12,а).

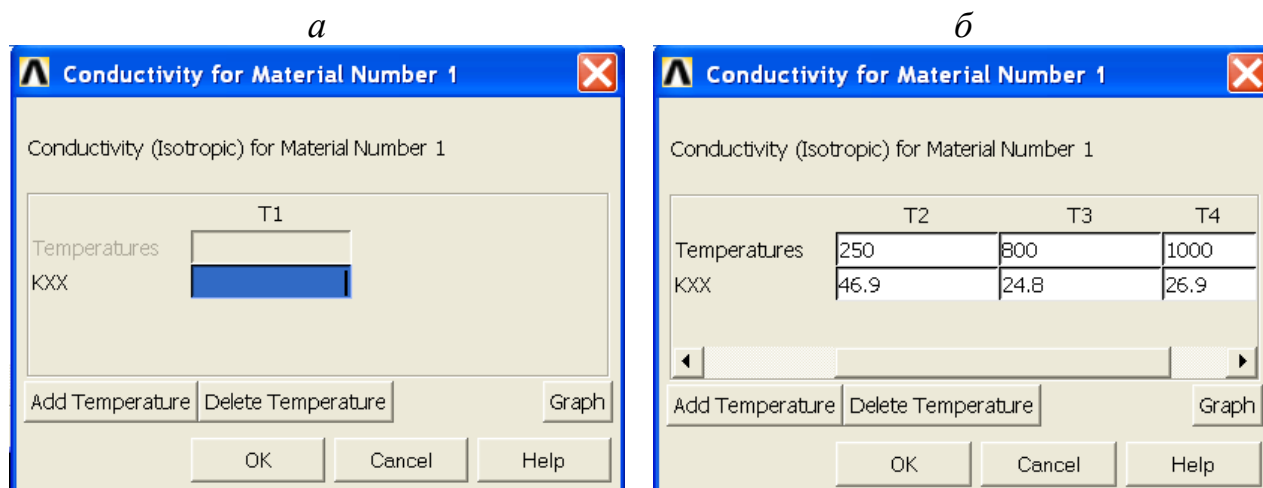


Рис. 2.12. Задание постоянной величины теплопроводности материала (*a*) и ее табличной зависимости от температуры (*б*)

Трижды нажать кнопку **ADD TEMPERATURE**, заполнить таблицу: в поля **TEMPERATURES** ввести **0, 250, 800, 1000**; в поля **KXX** ввести **51.9, 46.9, 24.8, 26.9**. Вид меню в процессе задания теплопроводности на рис. 2.12,б. Нажать кнопку **ГРАФИК**, посмотреть график зависимости теплопроводности от температуры (рис. 2.13). Из графика видно, что зависимость кусочно-линейная. Для завершения выполнить:

→**OK**→**Material**→**Exit**.

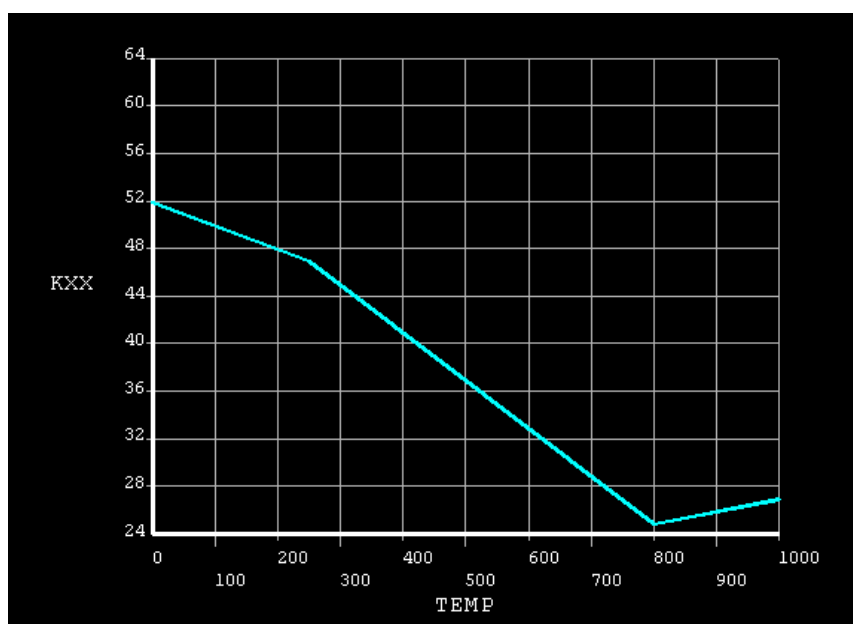


Рис. 2.13. График зависимости теплопроводности от температуры

Чтобы убрать график с экрана, нажать на правую клавишу мыши, затем в меню

→ **Replot.**

Прочие свойства материалов задаются выполнением аналогичных действий.

2.2.7. Выбор типа конечных элементов

Для генерации сетки должен быть определен тип конечных элементов, из которых она состоит. Таких элементов в ANSYS более ста. Элементы могут иметь разную форму и количество узлов, с ними могут быть соотнесены некоторые алгоритмы, определяющие особенности использования элементов в тех или иных расчетах (в прочностных, тепловых, магнитных и электрических, в расчетах движения жидкости или связанных задачах). Элементы могут быть как линейные, так и квадратичные (с промежуточными узлами в середине стороны). Для заданной сетки квадратичные элементы дают более точные результаты.

Значительная часть конечных элементов допускает приложение нагрузок, распределенных по элементу: давления, температуры, конвективные потоки и т. д. Для всех элементов допускаются узловые нагрузки (силы, температуры, перемещения и др.). При необходимости могут использоваться конечные элементы с поверхностным эффектом – для особых видов нагрузок, таких, например, как излучение и поверхностное натяжение. Возможен выбор между двумя типами конечных элементов с разной технологией вычислений – *h*-элементами и *p*-элементами. Конечные элементы могут разделяться на группы и по видам расчетного анализа: **Structural, Thermal, Fluid, Contact** и др.

На практике для выбора типа конечного элемента выполняется последовательность действий

MAIN MENU → PREPROCESSOR → ELEMENT TYPE → Add/Edit/Delete → Add... → Thermal Mass Solid; Brick 8 Node 70 → OK → CLOSE.

После команды **Add/Edit/Delete** появляется меню, показанное на рис. 2.14. Выбор элемента показан на рис. 2.15.

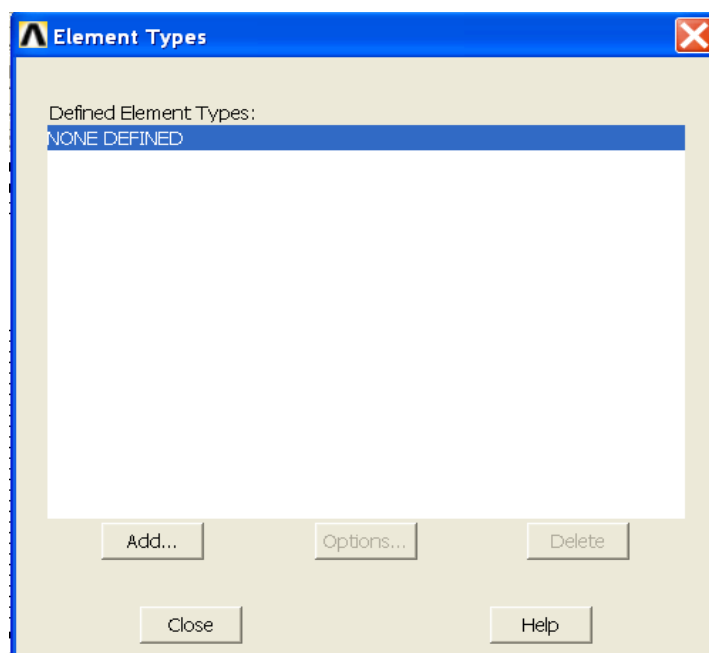


Рис. 2.14. Меню Element Types

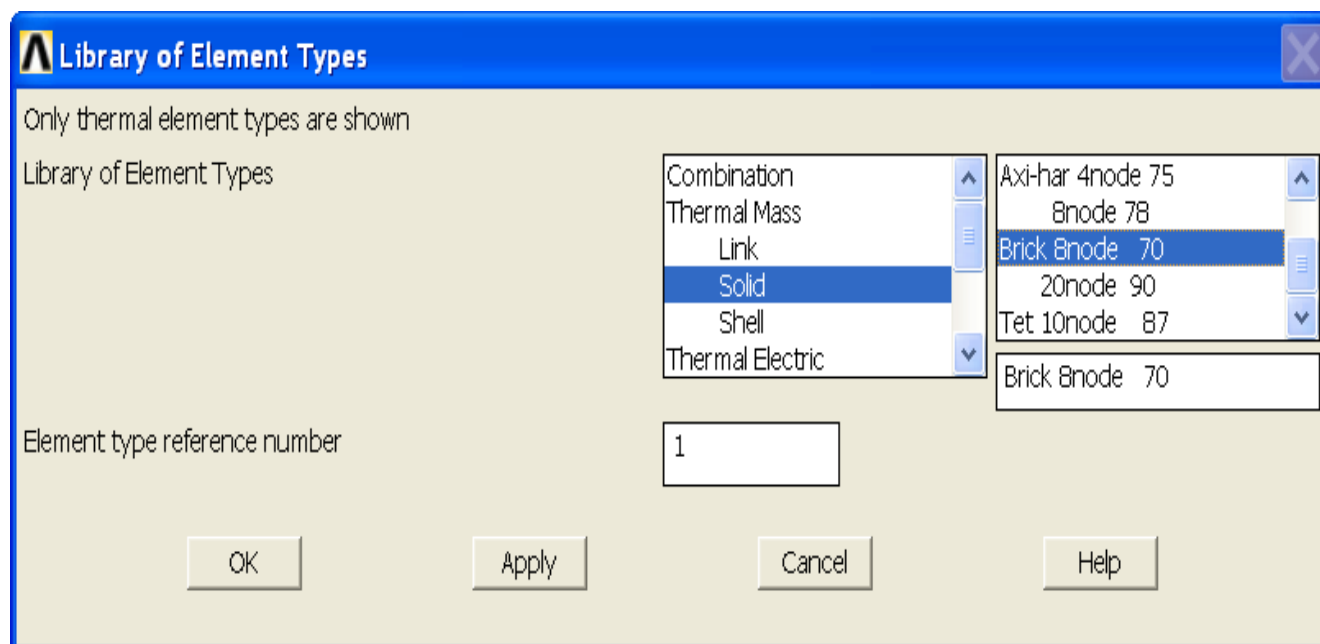


Рис. 2.15. Меню выбора из библиотеки элементов

2.2.8. Построение конечно-элементной модели

При решении задачи программа ANSYS использует конечно-элементный аналог геометрической модели объекта – сетку узлов и элементов. Примеры сеток показаны на рис. 2.16.

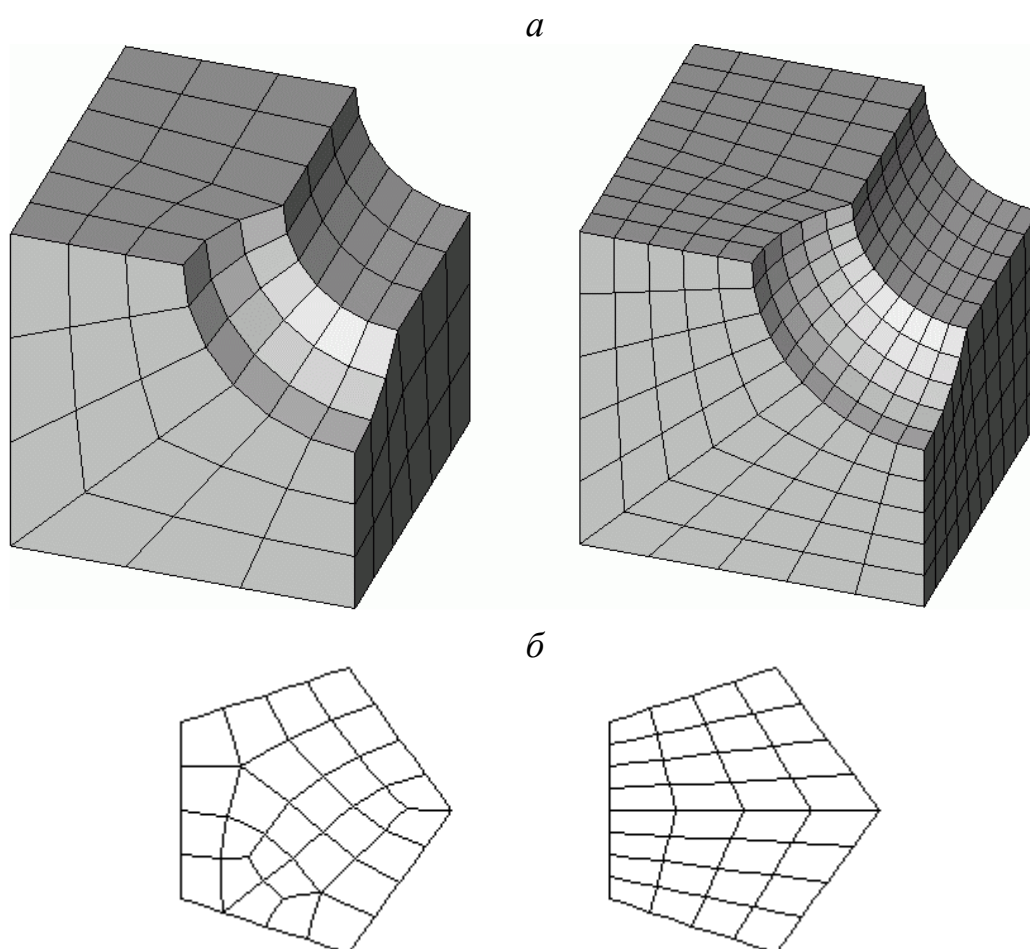


Рис. 2.16. Примеры построения конечно-элементных сеток:
а – сетки, отличающиеся размером элементов; *б* – произвольная и упорядоченная сетки

Используется ряд способов генерации сетки. Для автоматического **создания произвольной сетки** (рис. 2.16,б) применяют генератор произвольной сетки, который может наносить сетку на модели сложной формы. Сетка может строиться из треугольных, четырехугольных и четырехгранных элементов. При использовании тетраэдрной сетки можно получить объемную сетку высокого качества. Генераторы сетки имеют возможности управления ее качеством. Сетки строятся с учетом кривизны поверхности модели, размер элементов может выбираться заданием числового параметра; реализованы алгоритмы сглаживания и рафинирования размеров сетки. Можно выполнять деление граничной линии, устанавливать размеры элементов в окрестности заданных точек, коэффициенты растяжения или сжатия сетки вдали

от границ, ограничивать кривизну, автоматически устанавливать элементы заданного размера вдоль границ модели. Для лучшей стыковки областей с разной сеткой шестигранные сетки можно заменять четырехгранными из пирамидальных элементов.

Создание упорядоченной сетки увеличивает точность решения задач и требует предварительного разбиения модели на участки с простой геометрией, задания для этих участков атрибутов элементов и команд управления качеством сетки. Упорядоченная сетка может состоять из шестигранных, четырехугольных и треугольных элементов. Плоские элементы могут быть четырехугольными или треугольными, а объемные элементы – только шестигранными. Шестигранные элементы можно использовать для относительно простых областей модели, для остальных – тетраэдрные. В следующем разделе рассмотрено построение упорядоченной сетки посредством разбиения противоположных граничных линий.

Используется также **адаптивное построение сетки** программой, при котором итерационно меняется размер сетки, пока не будет обеспечена приемлемая величина расчетной погрешности сеточной дискретизации. При **непосредственном создании модели в интерактивном режиме** сетку строят, определяя положение каждого узла и параметры всех элементов сетки. **Метод экструзии** (выдавливания) используется для превращения областей двумерной сетки в трехмерные объекты, состоящие из параллелепипедов, клиновидных элементов или их комбинации. Созданные сетки могут модифицироваться с изменением их атрибутов и элементов.

С методами сеточного разбиения можно знакомиться по материалам следующего раздела. В нем содержится значительное число разнообразных примеров решения теплофизических задач.

2.2.9. Выбор типа анализа и задание нагрузок

Работа по этапу расчета начинается с **выбора типа анализа** **MAIN MENU→SOLUTION→ANALYSIS TYPE→NEW ANALYSIS→** В меню «New Analysis» (рис. 2.17) выбирается тип анализа. В задачах теплофизики используются позиции «Steady-State» – стационарный процесс (используется по умолчанию) и «Transient» – нестационарный процесс. Допустим, выбран нестационарный анализ

TRANSIENT → **OK**. В меню **Transient Analysis** выбрать **FULL** → **OK**.

В стационарном тепловом анализе нагрузками обычно называют граничные условия задачи. Подробно они рассмотрены в предыдущем разделе работы.

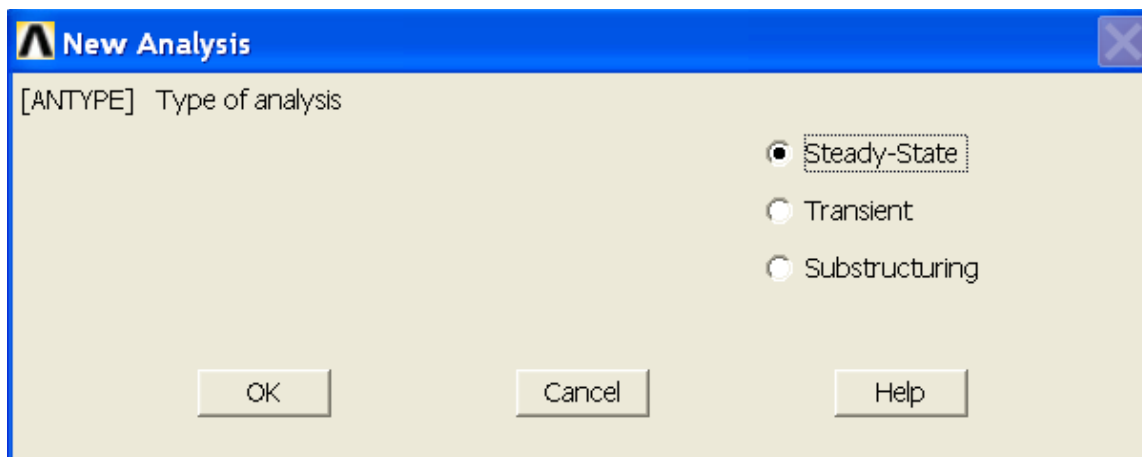


Рис. 2.17. Меню выбора типа анализа

2.2.10. Задание нагрузок при анализе нестационарного процесса

В задачах нестационарного теплообмена должны задаваться временные условия однозначности. Обычно начальные условия процесса задают как начальное распределение температуры. Для этого:

1) может быть задана общая начальная температура.

По материалам одного из примеров работы:

MAIN MENU → **SOLUTION** → **DEFINE LOADS** → **APPLY** → **INITIAL CONDITION** → **DEFINE** → В появившемся меню выбрать **Pick All** → В появившемся следующем меню выбрать **Lab = TEMP**, задать **Value = 25** → **OK** (начальная температура всего тела задана равной 25 °C);

2) можно задавать начальные температуры или по узлам, или по группам узлов и тем самым задавать любое распределение;

3) можно задавать начальное распределение температуры в нестационарной задаче, полученное из стационарного решения.

Задание опций решения задач нестационарного теплообмена подробно рассмотрено в примерах следующего раздела. Здесь следует отметить разницу между терминами **шаг нагружения** и **шаг решения**. Шаг нагружения – это та конфигурация нагрузок, для которой получено решение. Например, к конструкции можно приложить ветровую нагрузку на первом шаге нагружения, а на втором – гравитационную нагрузку. При нестационарном анализе полную последовательность нагрузок часто разбивают на несколько шагов нагружения. Шаг решения – это изменение шага расчета внутри шага нагружения; используется главным образом при нестационарном и нелинейном анализе для улучшения точности и сходимости.

2.3. Этап получения решения и постпроцессорной обработки результатов

2.3.1. Действия в процессе решения задачи

По команде *SOLVE* программа обращается за информацией о модели и нагрузках к базе данных и выполняет вычисления. Результаты записываются в специальный файл и в базу данных. При этом в базе данных может храниться только один набор результатов, тогда как в файл могут быть записаны результаты для всех шагов решения.

Опции шага нагружения используются для организации массивов выходных величин, управления сходимостью решения и обычного определения нагрузок на шаге нагружения. Так, например, пользователь может задать число дополнительных более мелких шагов в пределах одного шага нагружения или указать, должна ли нагрузка меняться плавно на данном шаге нагружения.

Решение уравнений, определяющих процесс, с граничными и начальными условиями – самая продолжительная стадия анализа, но вмешательства пользователя она не требует.

2.3.2. Просмотр результатов решения

Препроцессор выполняет графическое и табличное представление результатов. Результаты, записанные в базу данных на стадии решения, выводятся на экран или распечатываются на принтере. Возможно отображение результатов в плоскостях, пересекающих модель.

Процессор общего назначения может преобразовывать массивы результатов, сортировать, комбинировать, создавать на их основе листинги или графические изображения.

Табличные результаты – листинги – удобны для помещения их в отчеты, презентации и т. д. Им можно придавать удобную форму, сортировать. Наглядными могут быть данные, представленные в графической форме. Можно выводить области равных значений в виде изолиний, цветных полос, изоповерхностей. Могут строиться профили результатов, линии тока. Профиль результатов – это график, который показывает изменение расчетной величины на заданном пользователем пути. Линии тока показывают траектории движения частиц в движущемся потоке.

К данным на профиле результатов могут применяться математические операции (интегрирование, дифференцирование, умножение, скалярное и векторное произведение). Математическую обработку можно проводить для информации из таблиц конечных элементов. Результаты решения можно занести в таблицу элемента и использовать ее для выполнения арифметических операций над содержимым колонок таблицы. К наиболее распространенным операциям относятся сложение, умножение, деление, использование экспоненциальной зависимости и вычисление коэффициента запаса. Большинство операций с результатами выполняют для одного (например, последнего) шага решения.

Часто необходимо оценить расчетную погрешность результатов, обусловленную сеточной дискретизацией. Для этого постпроцессор отслеживает параметр сохранения энергии, вычисляемый для каждого элемента. Результаты анализа позволяют выделять участки сетки, которые нуждаются в измельчении.

Постпроцессор истории нагружения (для результатов, зависящих от времени) дает возможность представить результаты

расчета в виде зависимостей от времени или шагов нагружения. Эти результаты доступны для обозрения в графической или табличной форме.

Над функциональными зависимостями в постпроцессоре могут выполняться алгебраические преобразования. Новые кривые можно получать как результат операций сложения, вычитания, умножения и деления. Доступны и такие процедуры, как получение абсолютной величины, извлечение корня квадратного, нахождение логарифмов и экспонент, максимума и минимума. Значения скорости и ускорения можно получать как результат операций дифференцирования и интегрирования расчетных зависимостей.

Работа с постпроцессорами рассмотрена в примерах следующей главы работы.

Глава 3

УЧЕБНО-СПРАВОЧНЫЙ КОМПЛЕКТ РЕШЕНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ПАКЕТЕ ANSYS Multiphysics

3.1. Стационарный теплообмен в прямоугольной заготовке. Заданные температуры поверхностей

Постановка задачи

Прямоугольная стальная заготовка имеет размеры сечения 0,15х0,2 м. На поверхностях заготовки установлена температура: на верхней – 900 °С; на нижней – 250 °С; на левой – 750 °С; на правой – 400 °С. Определить распределения температуры, выполнить визуализацию решения. Расчетная схема показана на рис. 3.1. Теплопроводность материала заготовки, зависящая от температуры, задана таблицей:

Температура, °С	0	250	800	1000
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	51,9	46,9	24,8	26,9

Заготовка имеет значительную длину, поэтому при решении считается двумерной.

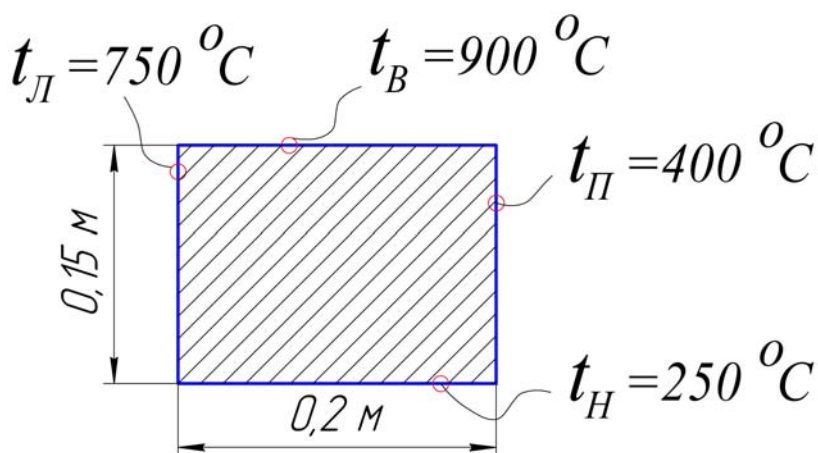


Рис. 3.1. Расчетная схема заготовки

Порядок решения

1. Задание типа анализа (тепловой расчет).

MAIN MENU→**PREFERENCES**→**THERMAL**→**OK**

2. Задание системы единиц СИ. Ввести в окно ввода команд **/UNITS,SI** →**ENTER**

3. Построение геометрической модели объекта.

Построить прямоугольник со сторонами 0,2 и 0,15 метра по осям **OX** и **OY**.

MAIN MENU →**PREPROCESSOR** →**MODELING**→**CREATE**→**AREAS**→**RECTANGLE**→**BY 2 CORNERS**→**X=0, Y=0, Width=0.2, Height=0.15**

4. Выбор типа конечного элемента.

MAIN MENU →**PREPROCESSOR**→**ELEMENT TYPE**→**Add/Edit/Delete**→**Add...**→**Thermal Mass Solid; Quad 4 node 55**→**OK**→**CLOSE**

5. Задание материала плиты.

MAIN MENU →**PREPROCESSOR**→**MATERIAL PROPS**→**MATERIAL MODELS**

Появляется меню определения свойств материала. Выбор позиций в меню производится двойным щелчком мыши (в ANSYS 12 щелчок одинарный).

=>**THERMAL**=>**CONDUCTIVITY** =>**ISOTROPIC**

Появляется окно определения теплопроводности.

Трижды нажать кнопку **ADD TEMPERATURE**, заполнить таблицу: в поля **TEMPERATURES** ввести **0, 250, 800, 1000**; в поля **KXX** ввести **51.9, 46.9, 24.8, 26.9**.

Нажать кнопку **ГРАФИК**, посмотреть график зависимости

теплопроводности от температуры (рис. 3.2). Из графика видно, что зависимость кусочно-линейная.

→**OK**→**Material**→**Exit**.

Чтобы убрать график с

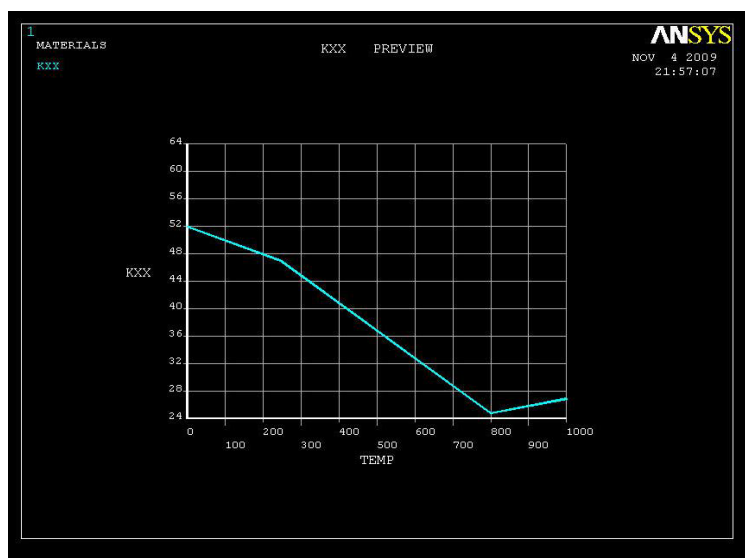


Рис. 3.2. Зависимость теплопроводности от температуры

экрана, нажать на правую клавишу мыши, затем в меню → **Replot**.

6. Построение конечно-элементной модели.

Определение среднего размера граней конечных элементов.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → SIZE CNTRLS → MANUAL SIZE → GLOBAL → SIZE → Задать **SIZE** равной **0.01** → **OK**

Наложение сетки.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → MESH → AREAS → FREE → PICK ALL

В графическом окне появляется объект с конечно-элементной сеткой, реверсивное изображение которого показано на рис. 3.3.

7. Сохранение промежуточных результатов работы.

UTILITY MENU → FILE → Save as Jobname

8. Задание граничных условий.

На верхней поверхности задать постоянную температуру 900°C .

MAIN MENU → SOLUTION → DEFINE LOADS → APPLY → THERMAL → TEMPERATURE → On Nodes

В меню «Apply Temp on Nodes» отметить (задать) точкой опцию → **BOX** →.

В графическом окне у объекта с сеткой

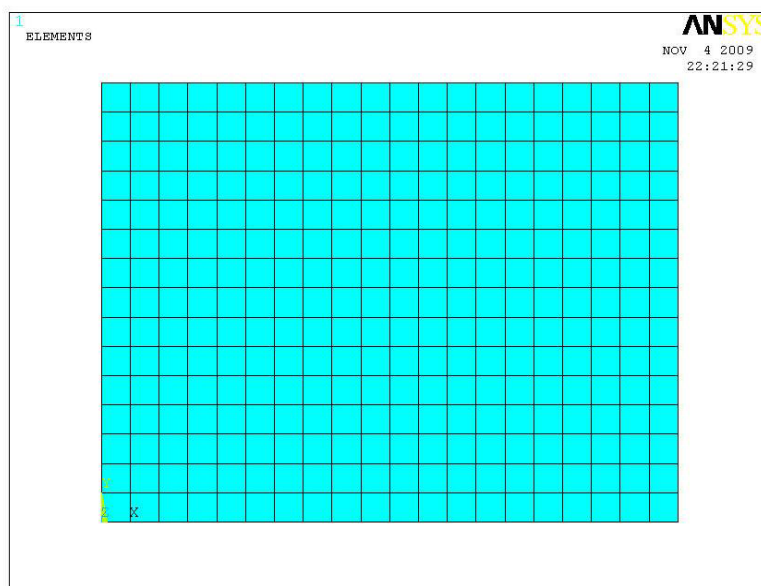


Рис. 3.3. Конечно-элементная сетка на заготовке

(рис. 3.3) обвести рамкой линию верхней границы так, чтобы в пределах рамки оказались все верхние узлы сетки. На верхних узлах сетки появятся квадратики → **OK**. В окне меню «Apply TEMP on Nodes» выделить надпись **TEMP**, в нижнем окне **VALUE ...TEMP** задать **900** → **OK**. Квадратики на нижней границе сменятся треугольниками, значит, граничное условие задано.

Аналогично температуре верхней задать температуру нижней поверхности -250°C ; левой -750°C ; правой -400°C .

9. Запуск решения задачи.

MAIN MENU→SOLUTION→ SOLVE→CURRENT LS→ (Просмотр информации: **file→close.**) **→OK →close** (закрывается сообщение о завершении решения). На экран выводится график, отслеживающий сходимость итерационного решения задачи нелинейного теплового анализа (рис. 3.4). На графике отображаются расчетная норма и критерий сходимости в процессе решения.

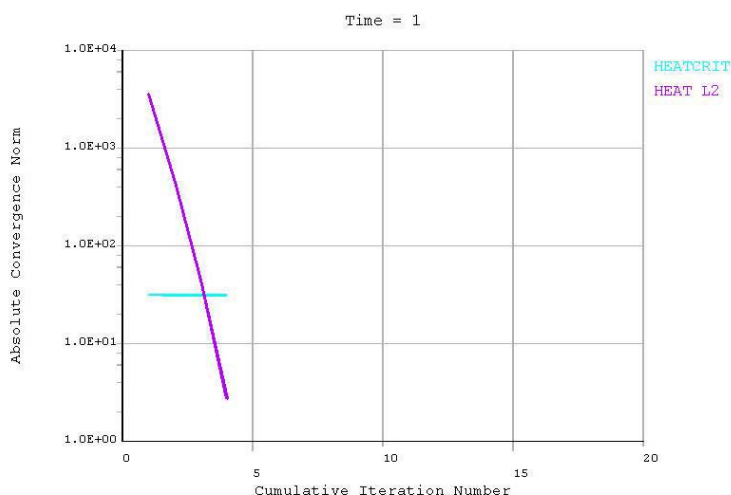


Рис. 3.4. Информация о процессе решения задачи

10. Просмотр и фиксация результатов расчета.

Изображение полей температуры в виде изолиний.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ PLOT RESULTS→CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU→DOF SOLUTION, Temperature TEMP→OK. Изображение показано на рис.3.5.

Определение параметров в указанных точках объекта.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→QUERY RESULTS→SUBGRID SOLUTION. В меню слева – **DOF solution**, справа – **Temperature TEMP**.

Щелчком мыши на объекте указать точку, в которой определяется температура. Появится квадрат и значение температуры, соответствующей его положению. В меню появятся точные значения координат, температуры и номера соответствующего узла сетки. После проверки параметра в нужных

точках →**OK**. На рис. 3.6 показана нижняя часть полученного таким образом рисунка.

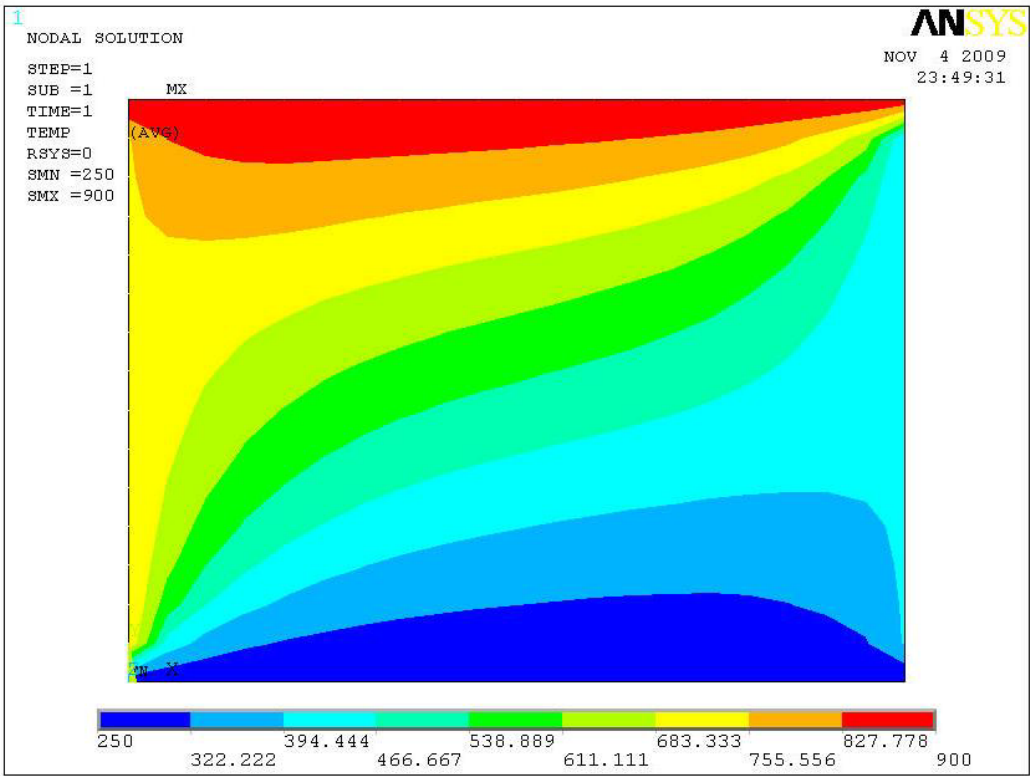


Рис. 3.5. Распределение температуры в сечении заготовки

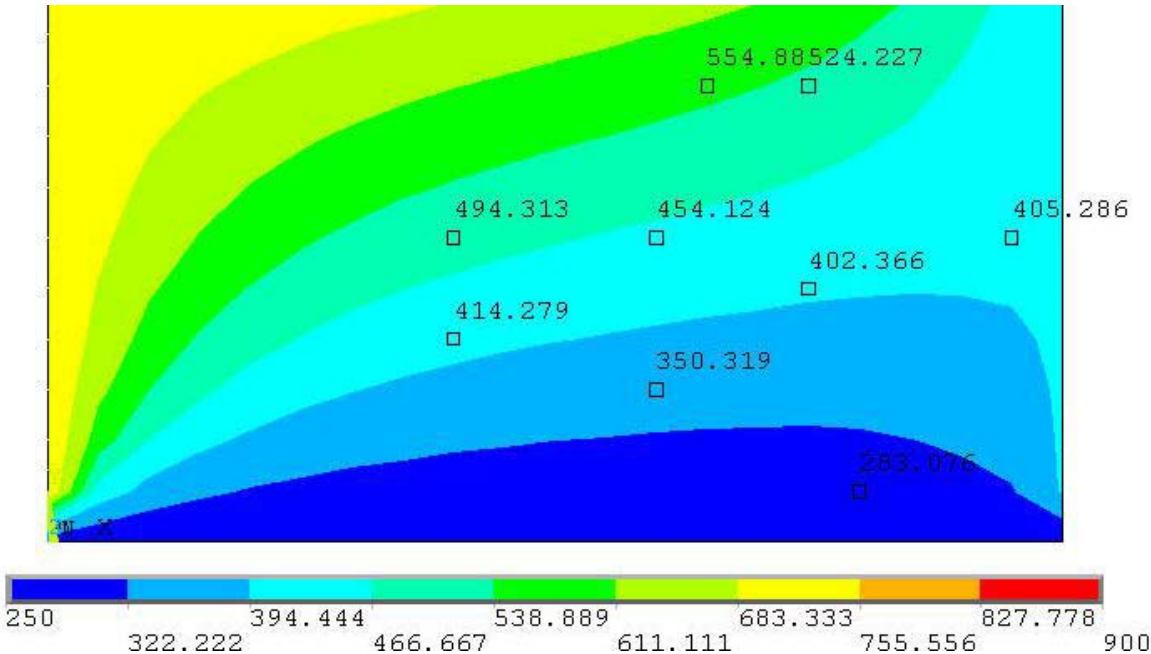


Рис.3.6. Значения температуры в точках объекта

3.2. Стационарный теплообмен в двумерной перфорированной плите. Смешанное задание граничных условий

Постановка задачи

Перфорированная стальная плита значительной ширины и протяженности нагревается конвекцией сверху. Температура греющей среды $t_{\text{ср}} = 600^\circ\text{C}$; коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha_k = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; температура нижней поверхности 50°C . Определить поле температуры в сечении и тепловой поток через пластину. Выполнить визуализацию решения, построить необходимые графики. Схема конструкции показана на рис. 3.7. Теплопроводность материала плиты $\lambda = 45 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

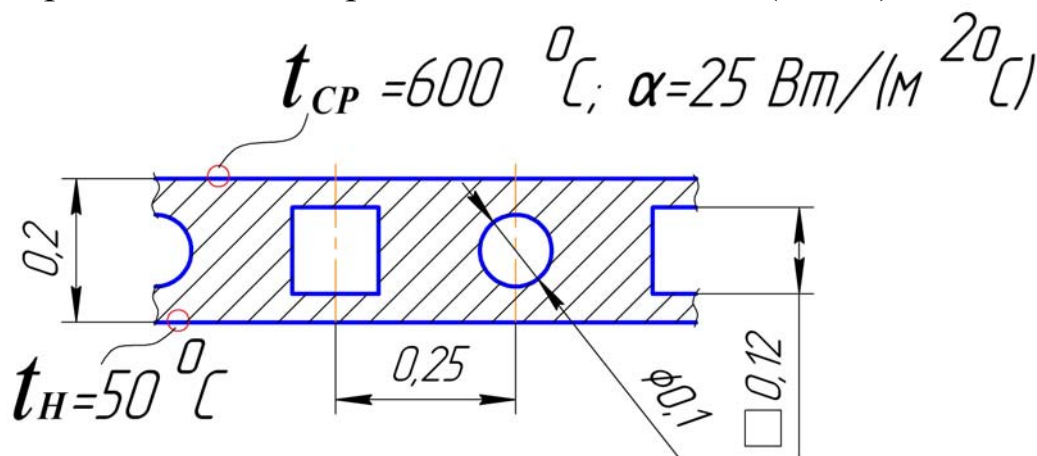


Рис. 3.7. Расчетная схема плиты

При решении задачи плита считается двумерной, ограниченной по ширине адиабатическими вертикальными плоскостями симметрии отверстий.

Порядок решения

1. Задание типа анализа.

MAIN MENU→**PREFERENCES**→**THERMAL**→**OK**

2. Задание системы единиц СИ. Ввести в окно ввода команд **/UNITS,SI** →**ENTER**

3. Построение геометрической модели объекта.

Построить прямоугольник со сторонами 0,25 и 0,2 метра по осям **OX** и **OY**.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MODELING → CREATE → AREAS → RECTANGLE → BY 2 CORNERS → X=0, Y=0, Width=0.25, Height=0.2

Построить прямоугольник со сторонами 0,06 и 0,12 метра по осям **OX** и **OY** на расстоянии 0.04 м от нижней поверхности.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MODELING → CREATE → AREAS → RECTANGLE → BY DIMENSIONS → X1=0; X2=0.06; Y1=0.04; Y2=0.16

Внутри контура объекта появится контур прямоугольного выреза.

Построить круг с координатами центра $X = 0,25$; $Y = 0,1$ и радиусом 0,05 м.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MODELING → CREATE → AREAS → SCHEMA → СПЛОШНОЙ КРУГ → X=0.25; Y=0.1; Radius=0.05

На правой границе объекта появится круг.

Произвести логическое вычитание из прямоугольника – контура детали прямоугольника – контура левого выреза и круга – контура правого выреза.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MODELING → OPERATE → BOOLEANS → SUBTRACT → AREAS

Слева появилось меню «Subtract Areas». Курсором выбрать наружный

прямоугольник

(щелчок на поле контура за пределами

вырезов) → **OK** →

выбрать левый прямоугольник

выреза, затем правый круг → **OK**.

На графическом экране появится

поперечное сечение

рассчитываемого объекта (рис. 3.8).

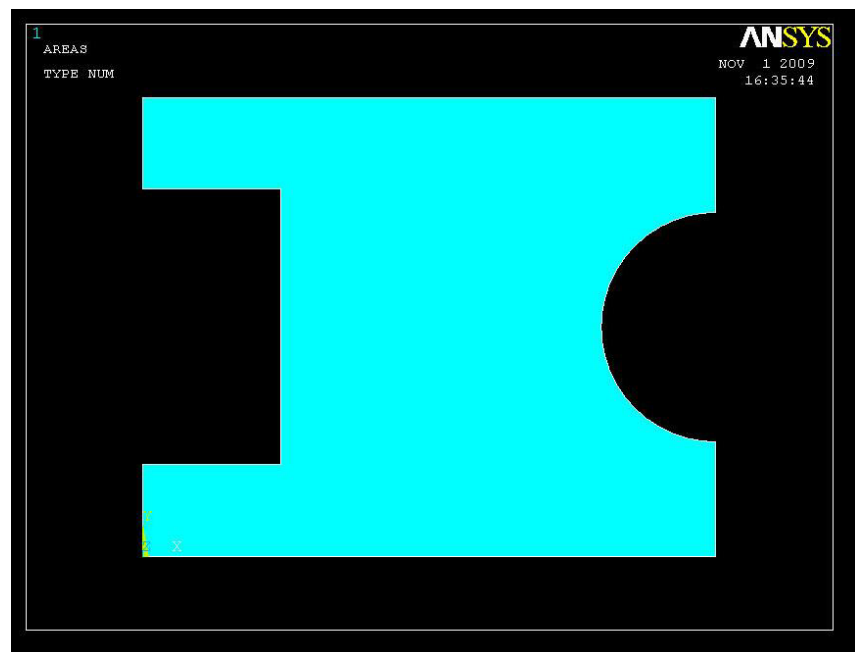


Рис. 3.8. Геометрическая модель плиты

4. Выбор типа конечного элемента.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → ELEMENT TYPE → Add/Edit/Delete → Add... → Thermal Mass Solid; Quad 4 node 55 → OK → CLOSE

5. Задание материала плиты.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MATERIAL PROPS → MATERIAL MODELS

Появится меню определения свойств материала. Выбор позиций в меню производится двойным щелчком мыши.

=> THERMAL => CONDUCTIVITY => ISOTROPIC

Появится окно определения теплопроводности. В нем в поле KXX ввести **45** → **OK** → **Material** → **Exit**.

6. Построение конечно-элементной модели.

Определение среднего размера граней конечных элементов.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → SIZE CNTRLS → MANUAL SIZE → GLOBAL → SIZE → Задать SIZE равной 0.01 → OK

Наложение сетки.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → MESH → AREAS → FREE → PICK ALL

В графическом окне появится объект с конечно-элементной сеткой, реверсивное изображение которого показано на рис. 3.9.

7. Сохранение

промежуточных результатов работы.

UTILITY MENU → FILE → Save as Jobname

8. Задание граничных условий.

На нижней поверхности задается постоянная температура 50 °C.

MAIN MENU → SOLUTION →

DEFINE LOADS → APPLY → THERMAL

→ TEMPERATURE → On Nodes

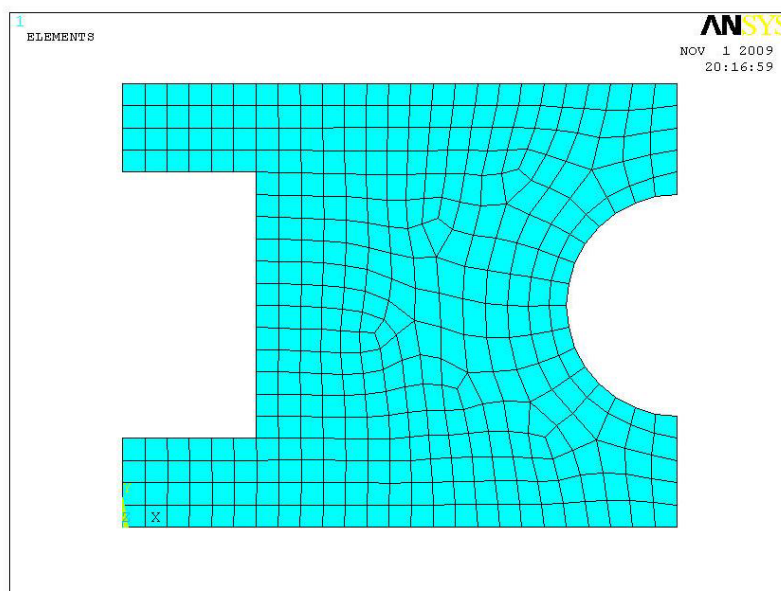


Рис.3.9. Объект с конечно-элементной сеткой

В меню «Apply Temp on Nodes» отметить точкой опцию →**BOX**→.
 В графическом окне у объекта с сеткой обвести рамкой линию нижней границы так, чтобы в пределах рамки оказались все нижние узлы сетки. На нижних узлах сетки появятся квадратики →**OK**. Появится меню «Apply TEMP on Nodes». В окне выделить надпись **TEMP**, в нижнем окне VALUE ...TEMP задать **50**→**OK**. Квадратики на нижней границе сменятся треугольниками, значит, граничное условие задано.

На верхней поверхности задать конвективный тепловой поток.

**MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY
 →THERMAL→ CONVECTION→On Lines**

Щелчок курсором по верхней границе плиты появится штриховая линия →**OK**.

Появится меню «Apply CONV on lines». В окна меню занести: SFL – **constant value**; VAL1.Film coefficient (коэффициент теплоотдачи) – **45**; SFL – **constant value**; VAL2I. Bulk temperature (температура среды) - **600**→**OK**. Появится предупреждение →**Close**. На верхней поверхности появилась стрелка, значит, условие задано. На боковых поверхностях условия не задавались, значит, эти поверхности адиабатические.

9. Запуск решения задачи.

MAIN MENU→SOLUTION→ SOLVE→CURRENT LS→
 (Просмотр информации: **file→close**.)→**OK** →**close** (закроется сообщение о завершении решения).

10. Просмотр и фиксация результатов расчета.

Изображение полей температуры в виде изолиний.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS
 →CONTOUR PLOT→NODAL SOLU→DOF SOLUTION,
 Temperature TEMP→OK**

Текущее изображение на экране показано на рис. 3.10.

Интересно сравнить поля суммарного теплового потока в сечении и проекции этого потока на ось Y. Изображение поля суммарного потока тепла (рис. 3.11) в графическом интерфейсе (GUI) получено

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS
 →CONTOUR PLOT→NODAL SOLU→THERMAL FLUX
 →ВЕКТОР СУММЫ...ПОТОКА→OK**

Аналогичные операции использованы для получения изображения поля проекции теплового потока на ось Y на рис. 3.12.

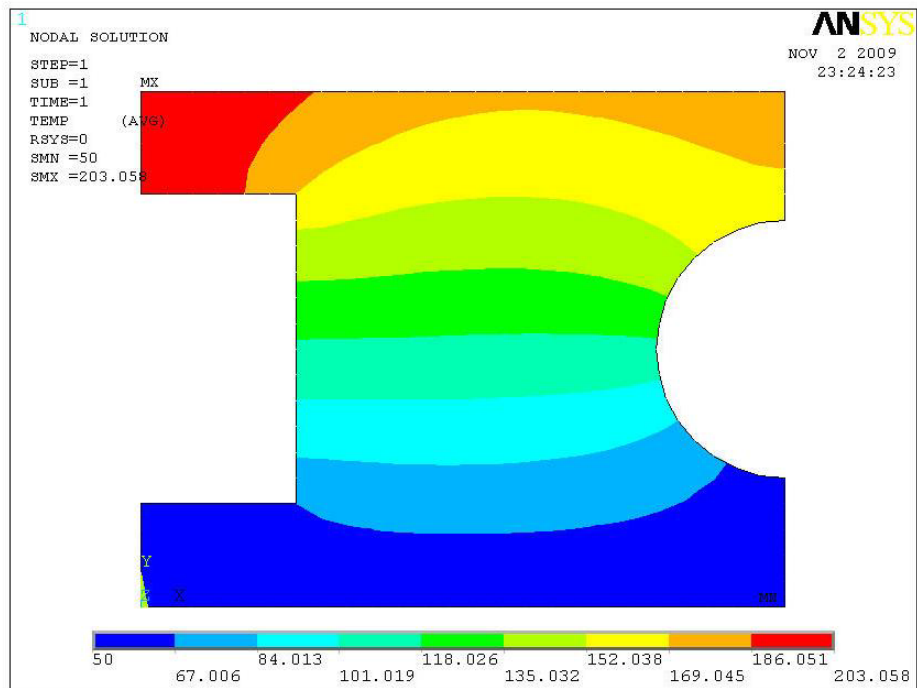


Рис. 3.10. Поле температуры в плите

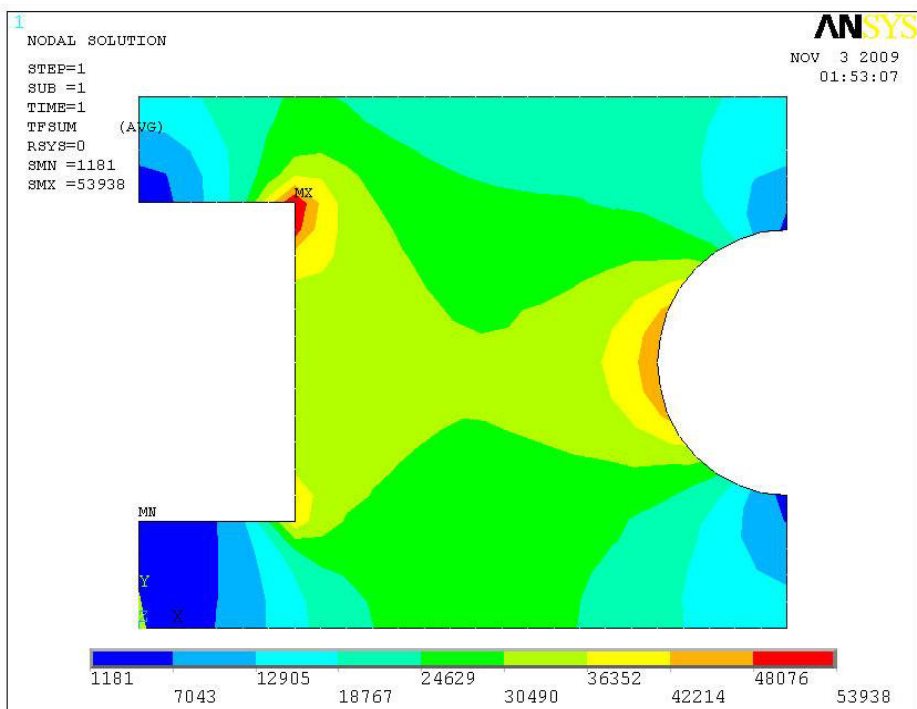


Рис. 3.11. Поле суммарного теплового потока

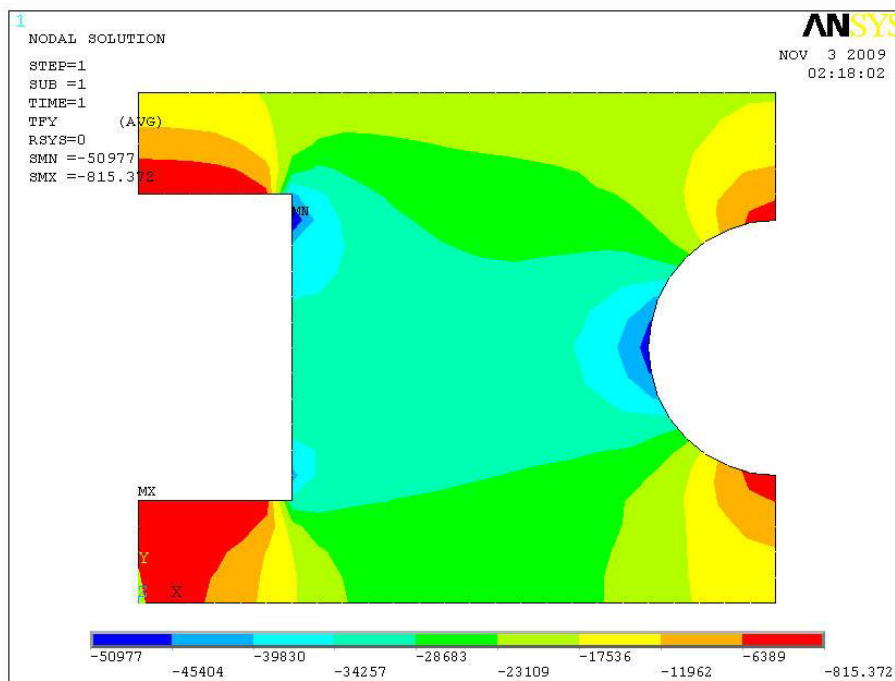


Рис. 3.12. Поле проекций теплового потока на ось Y

Для выяснения причины отличий рис. 3.11 и 3.12 строится поле векторов теплового потока.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS→VECTOR PLOT→PREDEFINED

В меню **Item Vector to be plotted** в левом окне выбрать **Flux & gradient**, в правом – **Thermal flux TF** (тепловой поток) →**OK**. Распределение суммарного теплового потока в векторном виде показано на рис. 3.13.

11. Для оценки точности решения задачи с используемой сеткой (рис. 3.9) сравнить суммарные тепловые потоки через разные по высоте горизонтальные сечения плиты.

○ Определение потока тепла через среднее по высоте плиты сечение.

Задать путь 1 для построения графика распределения проекции теплового потока на ось Y

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS→PATH OPERATIONS→DEFINE PATH→BY NODES

Курсором выделить два узла на левой и правой границах объекта в среднем по высоте плиты горизонтальном сечении (длина этого

пути равна 0,14 м) →**OK**→переменной **name** присваивается имя **FLUX1** →**OK**.

Определить параметр, который должен выводиться на график
MAIN MENU→**GENERAL POSTPROC** → **PLOT RESULTS**→**PATH OPERATIONS**→**MAP ONTO PATH**
(отобразить вдоль пути) → в меню выбирается: **Flux & gradient**, значение **TFY**, у переменной **/PBC** ставится отметка **YES** →**OK**.

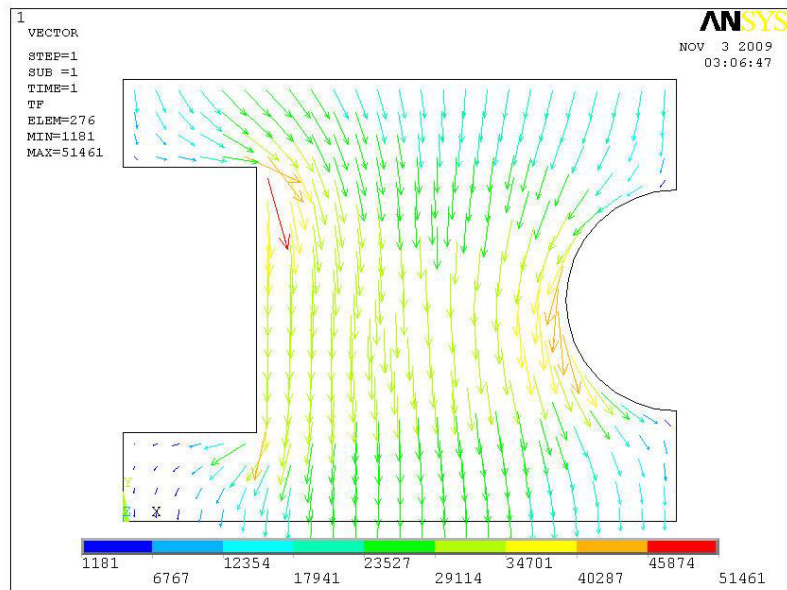


Рис. 3.13. Векторное поле тепловых потоков

Построить график
MAIN MENU→**GENERAL POSTPROC**→ **PLOT RESULTS** →**PATH OPERATIONS**→**PLOT PATH ITEM** (отобразить пункт пути) →**ON GRAPH**

В меню выбрать параметр **TFY** →**OK**. На графическом экране появится график (рис 3.14).

Приближенным интегрированием по данным, взятым из графика, определено среднее значение **TFY** равное 33 600 Вт/м². При ширине сечения 0,14 м суммарный поток через сечение расчетной заготовки длиной 1 м равен 33 600·0,14=4704 Вт/м.

○ Определение потока тепла через нижнюю поверхность плиты (описание краткое, т.к. действия аналогичны действиям предыдущего пункта).

Прочитать базу данных
UTILITY MENU→**FILE**→Прочитать БД из **Jobname.db**
На графическом экране появится сетка (рис. 3.9).

Задать путь 2. При этом курсором выделяются два узла на левой и правой границах нижней поверхности плиты (длина этого пути равна 0,25 м).

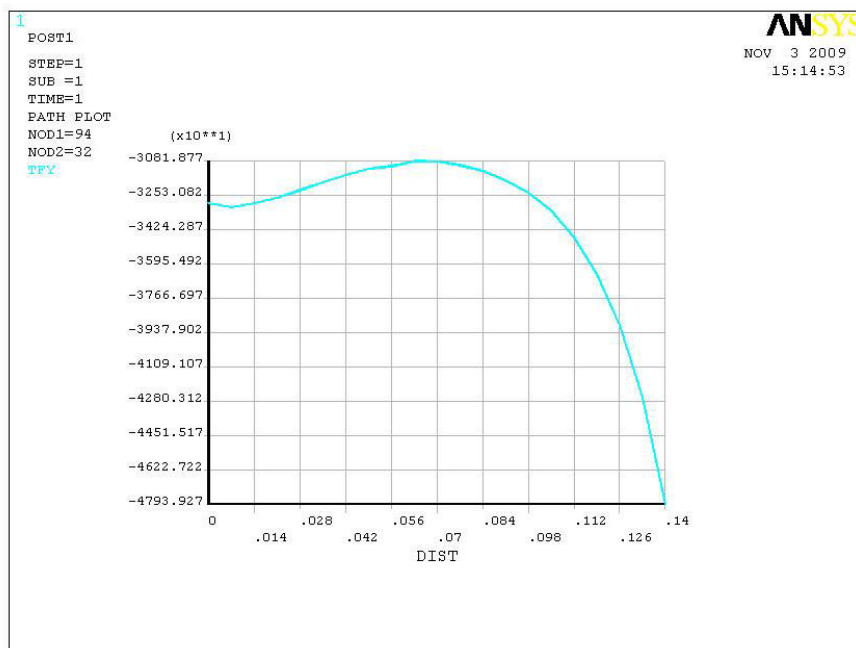


Рис. 3.14. Распределение суммарного теплового потока в среднем сечении по высоте плиты

В результате дальнейших действий получено распределение **TFY** на рис. 3.15. Интегрированием по графику рис. 3.15 определено среднее значение **TFY**, равное $18\,900\text{ Вт/м}^2$. При ширине сечения $0,25\text{ м}$ суммарный поток через сечение расчетной заготовки длиной 1 м равен $18\,900 \cdot 0,25 = 4725\text{ Вт/м}$. Величины суммарных потоков тепла, определенные разными способами, в пределах точности оценок совпали.

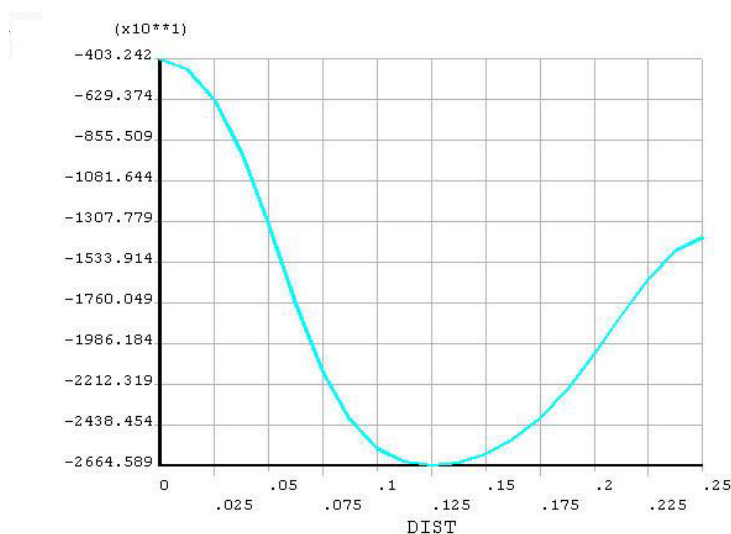


Рис. 3.15. Распределение потока тепла через нижнюю поверхность

3.3. Стационарный теплообмен в двумерной многослойной стенке. Нагрев группы тел

Постановка задачи

Боковые стены теплового агрегата выполнены из слоя твердого огнеупора и слоя волокнистой тепловой изоляции. Твердый огнеупор опирается на каркас из металлических брусьев. Схема расчетного узла конструкции показана на рис. 3.16. Суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением к стене от камеры печи считать равным $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, температуру «печи», нагревающей стенку, $t_{\text{п}}=1300^\circ\text{С}$, коэффициент конвективной теплоотдачи от стенки к окружающей среде $\alpha_{\text{к}}= 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, температуру окружающей среды 20°С . Определить поле температуры и тепловой поток через стену. Выполнить визуализацию решения, построить необходимые графики. Теплопроводность: материала брусьев $\lambda= 35 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; твердого огнеупора (шамота) $\lambda = 1,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$; волокнистого огнеупора $\lambda = 0,47 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$.

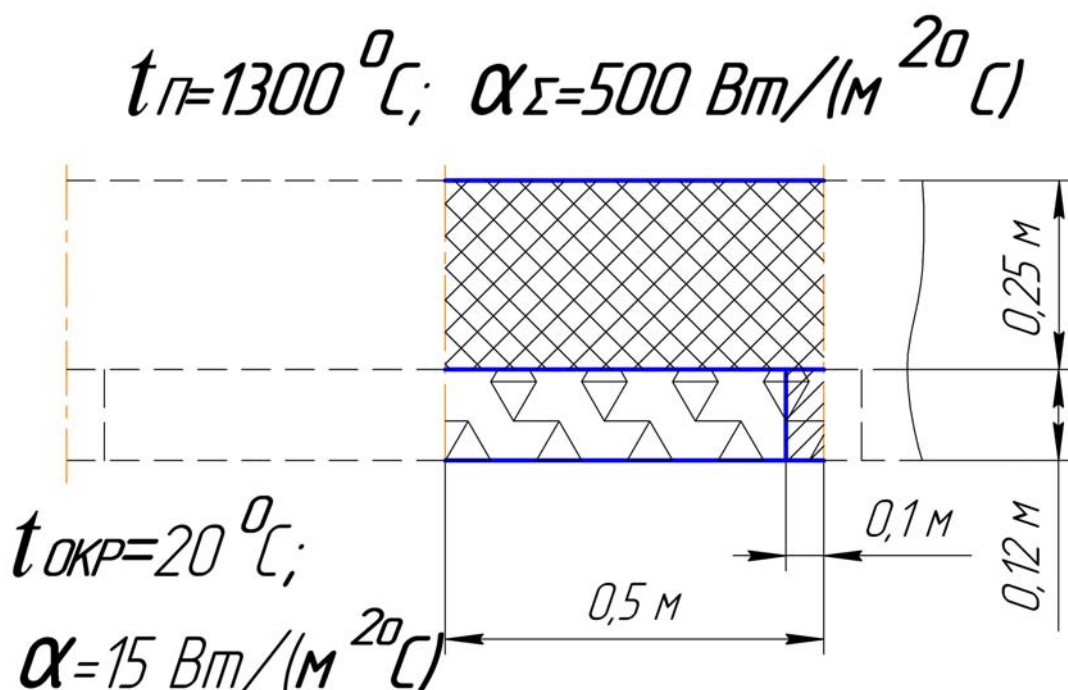


Рис. 3.16. Расчетная схема участка стены (вид сверху)

Расчетный участок стены считается двумерным. По ширине он ограничен адиабатическими вертикальными плоскостями: плоскостью симметрии стены между соседними брусками каркаса и плоскостью симметрии бруса.

Порядок решения

1. Задание типа анализа.

MAIN MENU→PREFERENCES→THERMAL→OK

2. Задание системы единиц СИ. Ввести в окно ввода команд **/UNITS,SI**

3. Построение геометрической модели объекта

Построить прямоугольник со сторонами 0,45 и 0,12 метра по осям **OX** и **OY**

MAIN MENU→PREPROCESSOR→MODELING→CREATE→AREAS→RECTANGLE→BY 2 CORNERS→X=0, Y=0, Width=0.45, Height=0.12

Построить прямоугольник со сторонами 0,05 и 0,12 метра по осям **OX** и **OY**

MAIN MENU→PREPROCESSOR→MODELING→CREATE→AREAS→RECTANGLE→BY 2 CORNERS→X=0.05, Y=0, Width=0.05, Height=0.12

Построить прямоугольник со сторонами 0,5 и 0,25 метра по осям **OX** и **OY**

MAIN MENU→PREPROCESSOR→MODELING→CREATE→AREAS→RECTANGLE→BY 2 CORNERS→X=0, Y=0, Width=0.5, Height=0.25

На экране появится прямоугольник, разделенный на 3 части в соответствии с рис. 3.16.

4. Объединение группы тел в единую составную стену.

MAIN MENU →PREPROCESSOR→MODELING→OPERATE→BOOLEANS→GLUE→AREAS → Pick all → OK

Это перенумерует области. Можно проверить номера поверхностей **UTILITY MENU→PLOTCTRLS→ NUMBERING→** Установить флажок **Area**. В окне **Replot→Yes→OK**. На поверхностях появятся номера **A1, A4, A5** (рис. 3.17). Удалится нумерация повтором действий, но со снятым флажком **Area**.

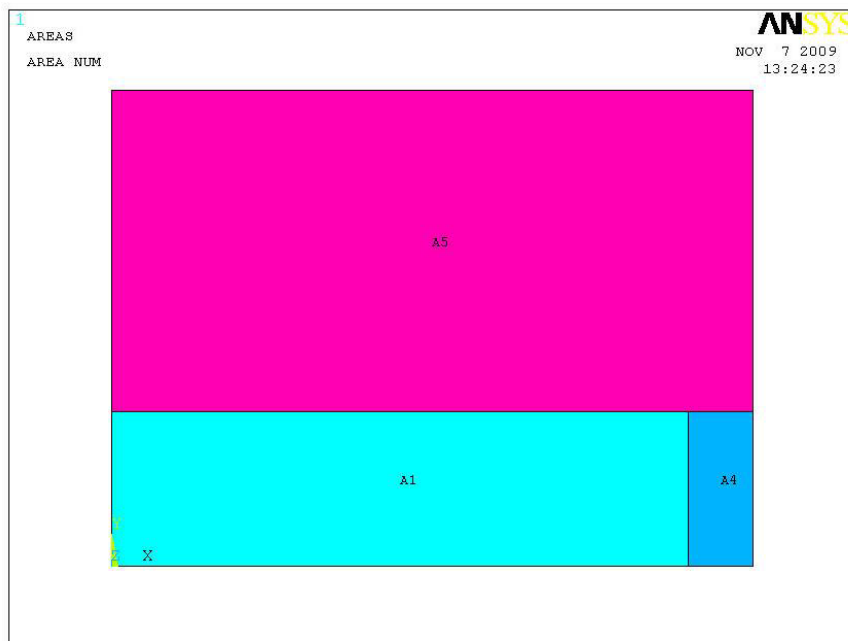


Рис. 3.17. Геометрическая модель составной стены

5. Выбор типа конечного элемента.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → ELEMENT TYPE → Add/Edit/Delete → Add... → Thermal Mass Solid; Quad 4 node 55 → OK → CLOSE

6. Задание материала стены.

Задать теплопроводность волокнистого материала

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MATERIAL PROPS → MATERIAL MODELS

Появится меню определения свойств материала № 1. Выбор позиций в меню произвести двойным щелчком мыши.

=> THERMAL => CONDUCTIVITY => ISOTROPIC

Появится окно определения теплопроводности. В нем в поле KXX ввести 0,47 (номер материала соответствует номеру прямоугольника на рис. 3.17)

Задать теплопроводность стального бруса

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MATERIAL PROPS → MATERIAL MODELS

В меню: **MATERIAL → НОВАЯ МОДЕЛЬ**. В меню определения номера материала ввести 4 (в соответствии со схемой рис. 3.17).

Слева появится надпись **Модель Материала 4**. Далее:

=> THERMAL => CONDUCTIVITY => ISOTROPIC

В окне определения теплопроводности ввести $KXX = 35$.

Задать теплопроводность шамота. Ввести новую **Модель Материала 5**, задать $KXX=1,3$.

→**OK**→**Material**→**Exit**.

7. Построение конечно-элементной модели.

Определить средний размер граней конечных элементов

MAIN MENU →**PREPROCESSOR**→ **MESHING**→**SIZE CNTRL**→**MANUAL SIZE**→**GLOBAL**→**SIZE**→Задать **SIZE** равной **0.02** →**OK**

Наложить сетку

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→ **MESHING**→**MESH**→**AREAS**→**FREE**→ **PICK ALL**

В графическом окне появится объект с конечно-элементной сеткой, реверсивное изображение которого показано на рис. 3.18.

8. Сохранение промежуточных результатов работы.

UTILITY MENU→**FILE**→**Save as Jobname**

9. Закрепление свойств материалов за частями составного объекта.

Закрепить свойства материала 1 за поверхностью 1

UTILITY MENU→**SELECT**→**ENTITIES**

В меню **Select Entities** в верхнем окне выбрать →**Areas**, в окне ниже должно быть →**By Num/Pick** →**OK**. Появится меню **Select areas**, в окно которого ввести цифру **1** →**OK**.

UTILITY MENU→**SELECT**→**ENTITIES**

В меню **Select Entities** в верхнем окне выбрать →**Elements**, в окне, где было **By Num/Pick**, выбрать **Attached to**, затем ниже выбрать →**Areas** →**OK**.

Обновить изображение

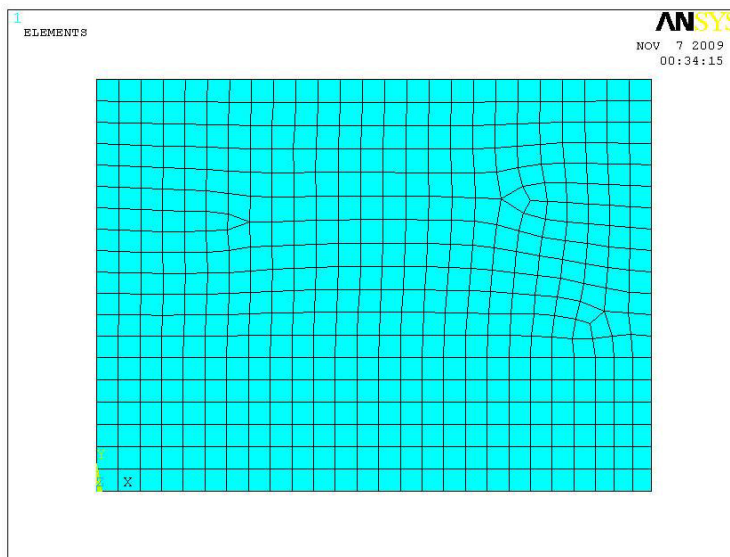


Рис. 3.18. Конечно-элементная сетка

UTILITY MENU→PLOT→Replot. На экране появится изображение участка с волокнистым материалом. В окно команд ввести **mpchg,1,all →ENTER**

Закрепить свойства материала 4 за поверхностью 4. Повторить все операции предыдущего пункта с поверхностью № 4 (вместо 1 вводить цифры 42). На экране появится отдельное изображение участка поверхности бруса.

Повторить все операции еще раз для закрепления свойств материала 5 за поверхностью 5.

Восстановить на экране изображение всех поверхностей стены

UTILITY MENU→SELECT→Everything

UTILITY MENU→PLOT→Replot

10. Вывод изображения, контролирующего правильность выполненных процедур.

UTILITY MENU→PLOTCTRLS→ NUMBERING→ Установить флажок **Elements→ APPLY**. В окне **Attrib numbering** выбрать **Material number →OK**. На экране изображена составная стена рис. 3.19, участки которой выделены цветом и содержат номера присвоенных им моделей материалов.

11. Задание граничных условий.

На нижней (наружной) поверхности стены задать конвективный тепловой поток.

MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY →THERMAL→ CONVECTION→On Lines

Щелчок курсором по нижней границе стены сначала под волокнистой изоляцией, затем под брусом – появятся штриховые линии→**OK**.

Появляется меню «Apply CONV on lines». В окна меню занести: SFL – **constant value; VAL1.Film coefficient** (коэффициент теплоотдачи) – **15; SFL – constant value; VAL2I. Bulk temperature** (температура среды) – **20→OK**. Значения величины заданы в соответствии с рекомендациями [20] . Появляется предупреждение →**Close**. На поверхностях появились стрелки, значит, условие задано.

На верхней (тепловоспринимающей) поверхности стены задать аналогичный конвективному суммарный тепловой поток излучения и конвекции. Его величина приближенно оценена по рис. 169 из [21]

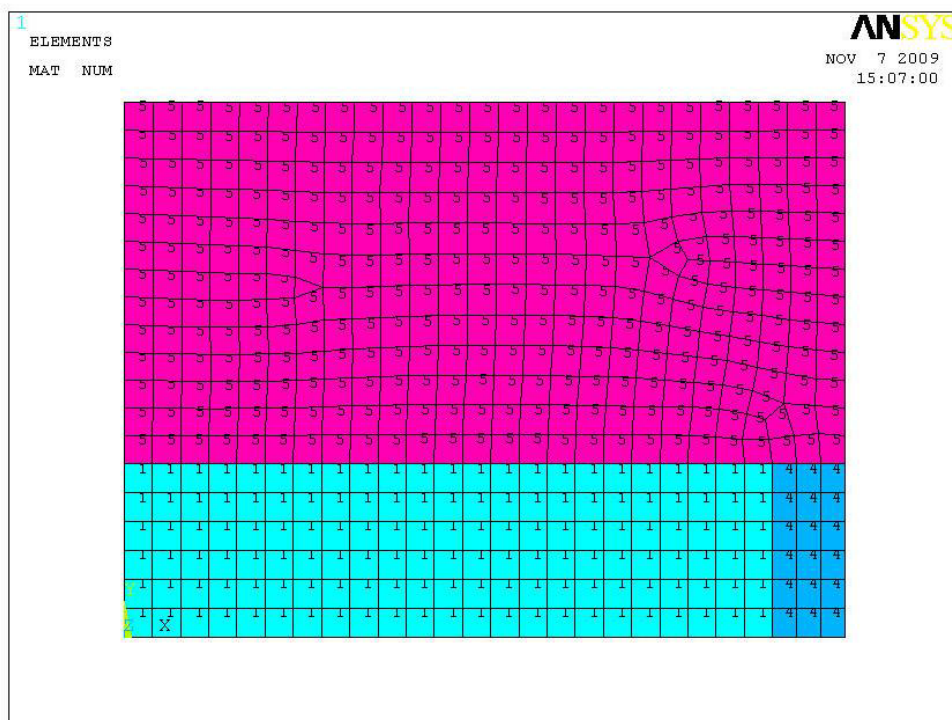


Рис.3.19. Схема стены с обозначениями материалов

MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY→THERMAL→ CONVECTION→On Lines

Щелчок курсором по верхней границе стены – появится штриховая линия →**OK**.

В окна меню «Apply CONV on lines» занести: SFL – **constant value**; VAL1.Film coefficient (коэффициент теплоотдачи) – **500**; SFL – **constant value**; VAL2I. Bulk temperature (температура среды) – **1300**→**OK**. Появится предупреждение →**Close**. На поверхности появилась стрелка, значит условие задано. На боковых поверхностях условия не задавались, следовательно, эти поверхности адиабатические.

12. Запуск решения задачи.

MAIN MENU→SOLUTION→ SOLVE→CURRENT LS→ (Просмотр информации **file→close**.) →**OK** →**close** (закроется сообщение о завершении решения).

13. Просмотр и фиксация результатов расчета.

Изображение полей температуры в виде изолиний

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ PLOT
RESULTS→CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU→DOF
SOLUTION, Temperature TEMP→OK
 Изображение показано на рис. 3.20.

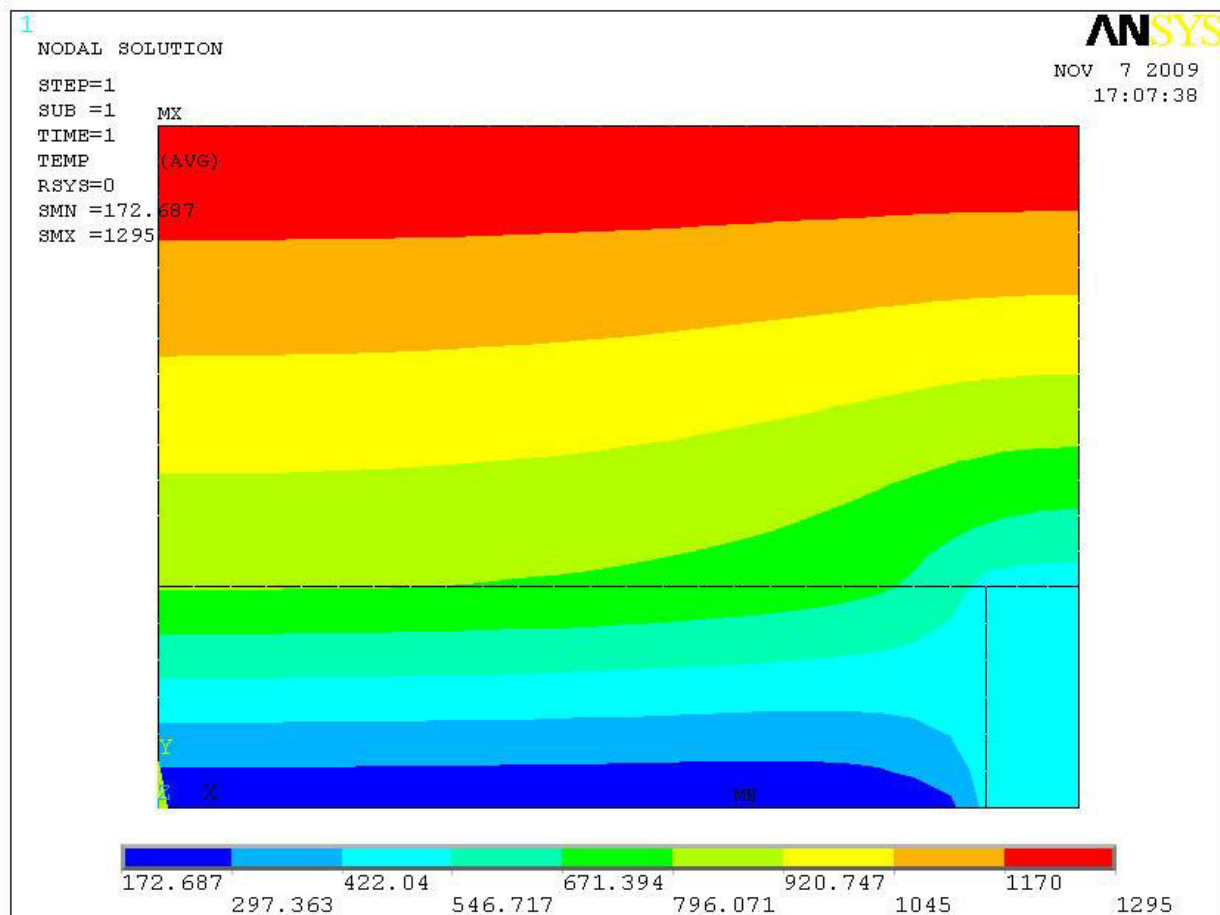


Рис. 3.20. Поле температуры в стене агрегата

Во многих случаях информация о полях температуры может оказаться недостаточно подробной. Предусмотрен вывод значений температуры в узлах сетки. Вывод на экран нумерации узлов.

UTILITY MENU→ PLOTCTRLS→ NUMBERING→ Установить флажок **Node**. В окне **Replot→Yes→OK**. Изображение показано на рис. 3.21. Вывод результатов в табличной форме

UTILITY MENU→LIST→RESULTS→Nodal Solution

На экран выводится листинг, содержащий номера всех узлов и соответствующие им температуры.

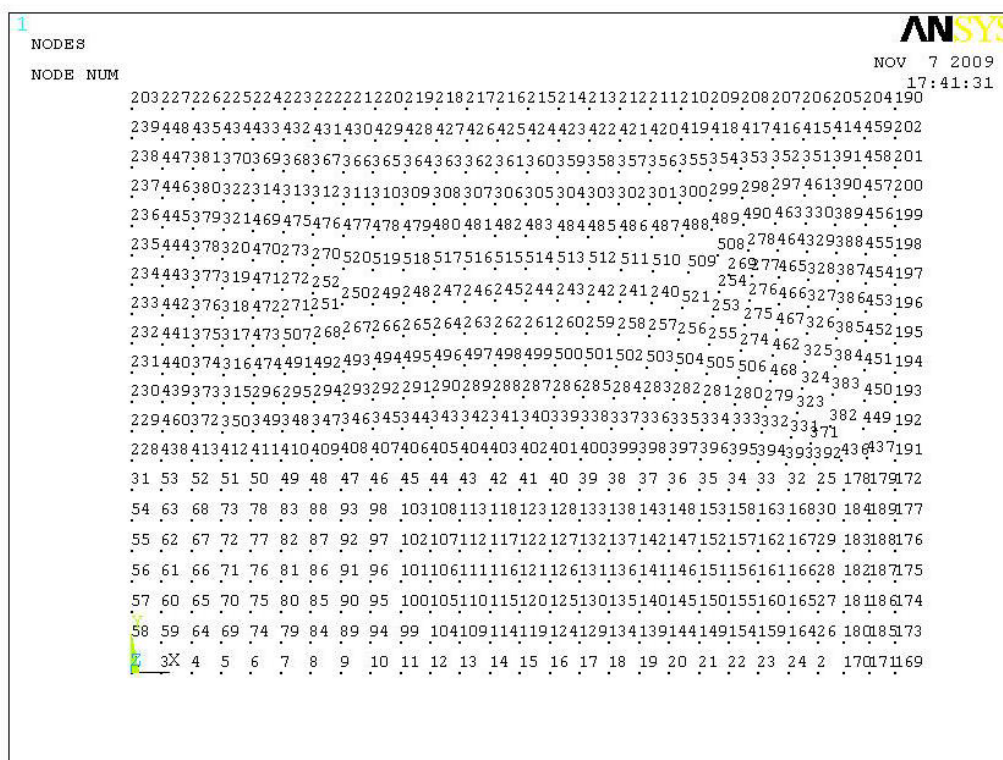


Рис. 3.21. Схема нумерации узлов сетки

Из рис. 3.20 видно соответствие полей температуры в стенке заданным условиям нагрева. В частности, заметно подстуживающее влияние бруса на температуру шамотной стенки и тепловой изоляции.

Способы более подробного отображения и анализа результатов решения задачи рассмотрены выше.

3.4. Стационарный теплообмен в рекуператоре с трехмерными оребренными стенками

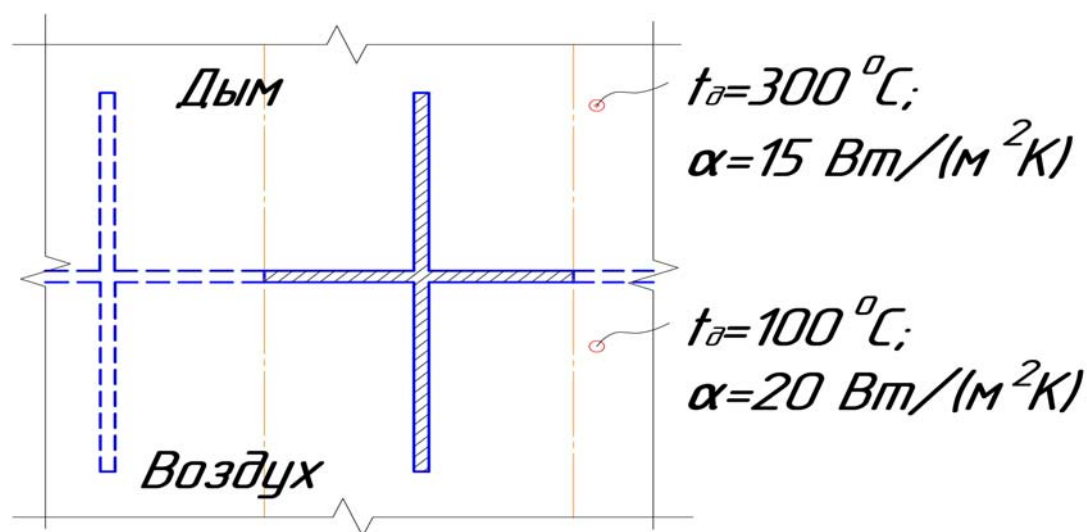
Постановка задачи

От горячего дыма, движущегося в верхнем канале, конвекцией и теплопроводностью передается тепло к холодному воздуху, движущемуся в нижнем канале. Теплопередающая стенка имеет

прямые ребра с обеих сторон, которые увеличивают теплопередачу. Конструктивная схема, геометрические размеры и исходные данные расчета показаны на рис. 3.22,а.

Рекуператор имеет повторяющийся по длине конструктивный элемент, образующий расчетный участок (рис. 3.22,б). Материал оребренной стенки – сталь. Задача рассматривается как трехмерная для иллюстрации особенностей методики расчета в ANSYS. Боковые поверхности горизонтальной части стенки адиабатические.

а



б

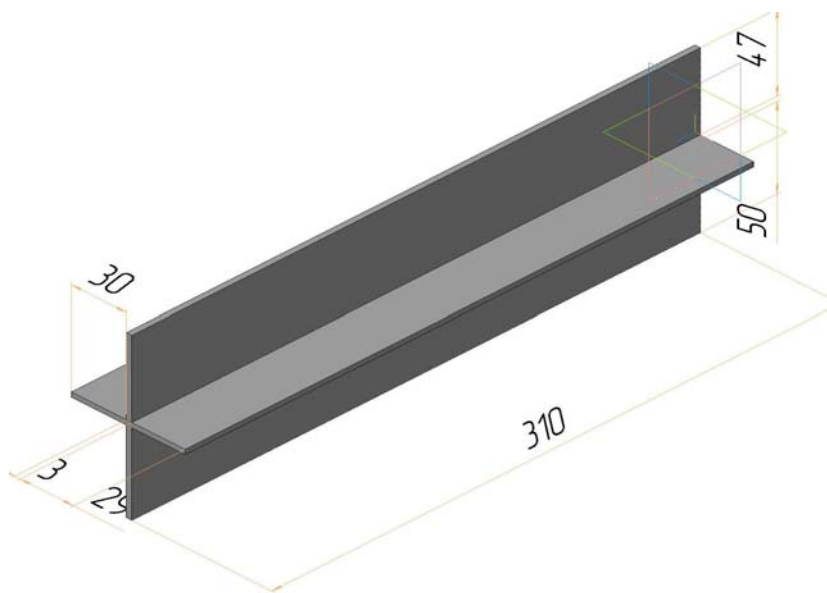


Рис. 3.22. Расчетная схема рекуператора:
а- конструкция рекуператора; б- схема расчетного участка

Порядок решения

1. Задание типа анализа.

MAIN MENU→PREFERENCES→THERMAL→OK

2. Задание системы единиц СИ. Ввести в окно команд **/UNITS,SI**

3. Модель объекта (рис. 3.22,б) подготовлена в программе КОМПАС – 3D и сохранена в формате **ParaSolid**. В созданную ранее директорию (папку) **C:\calc.ansys** поместить файл с импортируемой геометрической моделью объекта (в контрольном расчете использовался файл **stenka1k.x_t**).

Выполнить **UTILITY MENU→FILE→Import→PARA...** В окне «Drives» меню «ANSYS Connection for Parasolid» выбрать диск **C**, в окне «Directories» выбрать **C:\calc.ansys**; в окне «File Name» выбрать **stenka1k.x_t→Клик→(имя файла перешло вверх)**, в окне «Geometry Type» выбрать **Solids Only →OK**.

В графическом окне появится модель в виде каркаса. Для перехода к полутонному отображению

UTILITY MENU→PLOTCTRLS→STYLE→SOLID Model Facets

В меню «SOLID Model Facets» вместо стиля «Wireframe» установить **Normal Faceting→OK**.

Обновить изображение **UTILITY MENU→PLOT→Replot**. Полученное изображение показано на рис. 3.23.

4. Задание материала плиты.

**MAIN MENU→PREPROCESSOR→MATERIAL PROPS
→MATERIAL MODELS**

Появится меню определения свойств материала. Выбор позиций в меню производится двойным щелчком мыши.

=>THERMAL=> CONDUCTIVITY=> ISOTROPIC

Появится окно определения теплопроводности. В нем в поле **KXX** ввести **45 →OK→Material→Exit**.

5. Выбор типа конечного элемента.

**MAIN MENU →PREPROCESSOR→ ELEMENT TYPE
→Add/Edit/Delete→ Add...→ Thermal Mass Solid; Brick 8 Node
70→ OK→CLOSE**

6. Построение конечно-элементной модели.

MAIN MENU →PREPROCESSOR→ MESHING→Mesh Tool

В меню «Mesh Tool»: Shape – **Hex** – Sweep – **Sweep** (область выбора в нижней части меню).

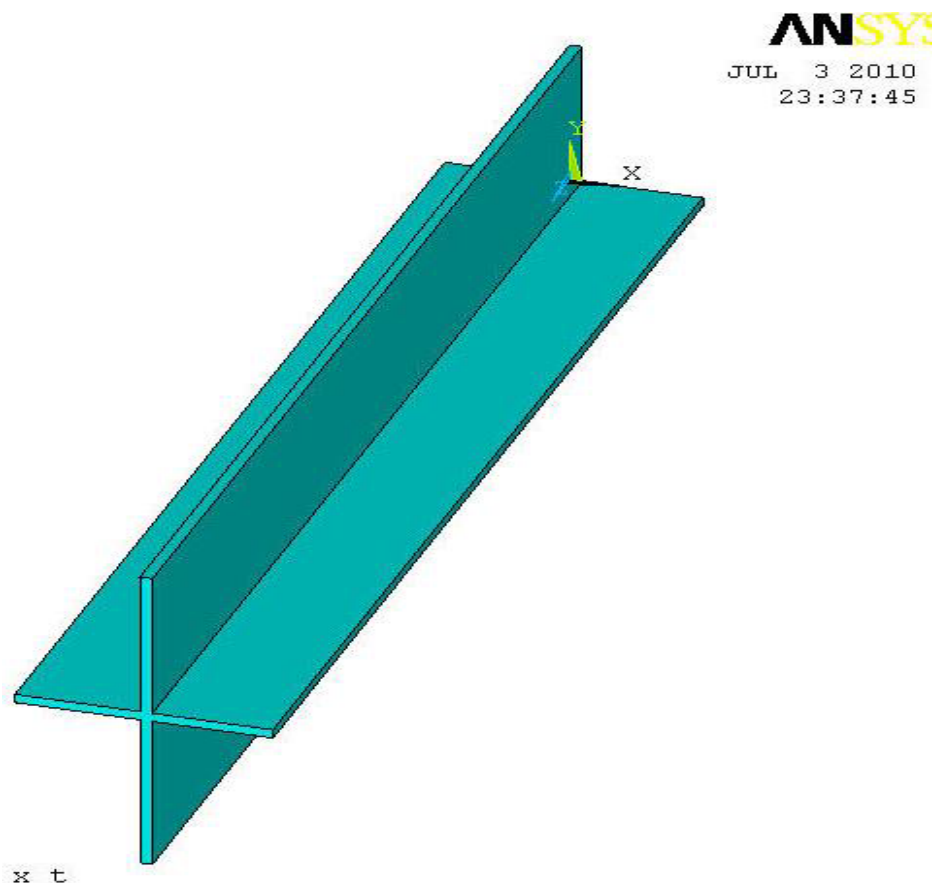


Рис. 3.23. Геометрическая модель после ее импорта в ANSYS

Выделить объем (щелчок по модели в графическом окне)→**OK**. В графическом окне появится объект с конечно-элементной сеткой, которая показана на рис. 3.24. Иной способ сеточного разбиения объектов будет рассмотрен позже.

7. Сохранение промежуточных результатов работы.

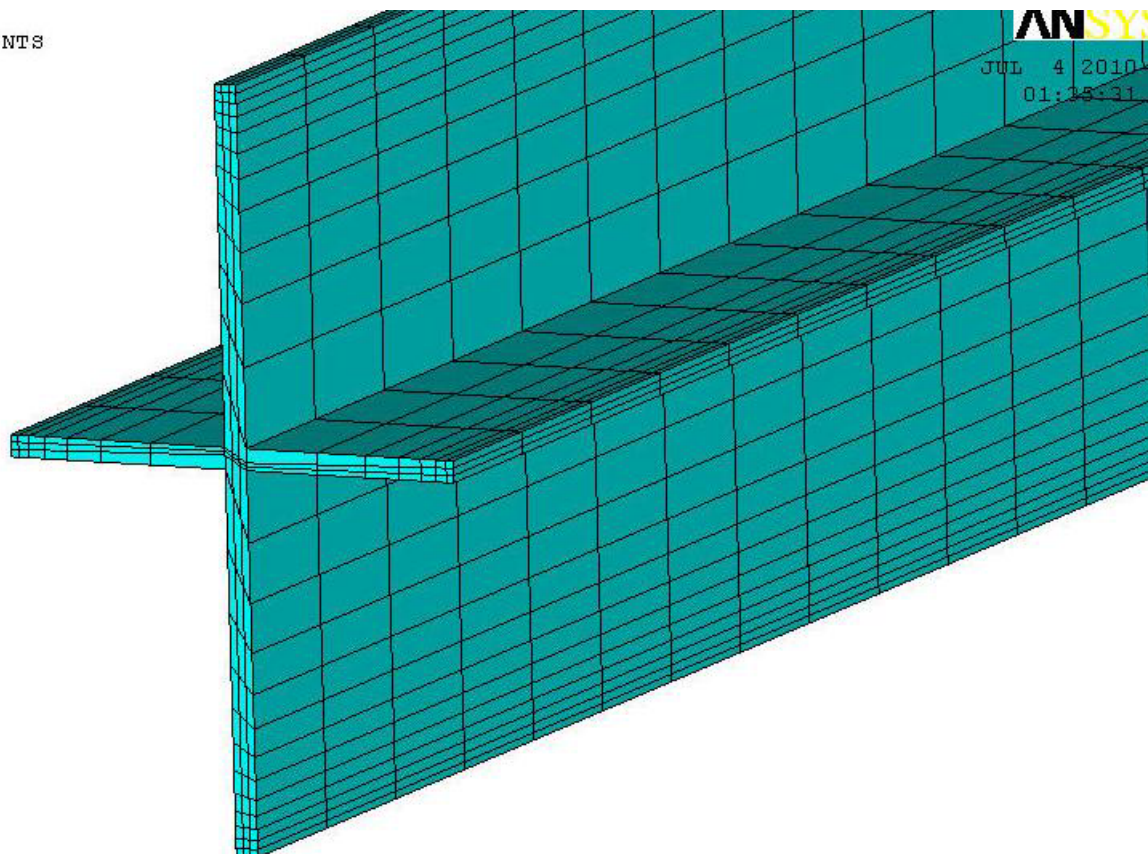
UTILITY MENU→FILE→Save as Jobname

8. Задание граничных условий.

На верхней поверхности задать конвективный тепловой поток.

**MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY
→THERMAL→ CONVECTION→On Areas**

Появится меню «Apply CONV on Areas». В графическом окне щелчком по серединам (центрам тяжести) пяти отдельных плоскостей, составляющих верхнюю поверхность стенки, выделить плоскости (при ошибках нажатием правой кнопки мыши сменить



File: C:\calc.ansys\stenkalk.x t

Рис. 3.24. Конечно-элементное разбиение объекта

курсор – стрелку \uparrow на стрелку \downarrow – и повторным щелчком снять неправильное выделение). Левая и правая плоскости горизонтальной части стенки не выделяются, что равносильно заданию адиабатических условий. \rightarrow OK.

Появится новое меню «Apply CONV on Areas». В его окно «SFA» ввести **Constant value**, в окно «Film coefficient» ввести **15**, в окно «Bulk temperature» ввести **300**. \rightarrow OK. Изображение в графическом окне изменится (рис. 3.25).

Задать конвективный тепловой поток на нижней поверхности. Нажать кнопку **Dynamic Model Mode** справа от графического окна (на ней значок мыши и куба) и повернуть объект так, чтобы стали видны нижние поверхности (при нажатой правой кнопке). Дальнейшие действия аналогичны предыдущему пункту. Задать для нижней поверхности «Film coefficient» (коэффициент теплоотдачи) равным **20**, а «Bulk temperature» – **100**. Полученное изображение в графическом окне показано на рис. 3.26.

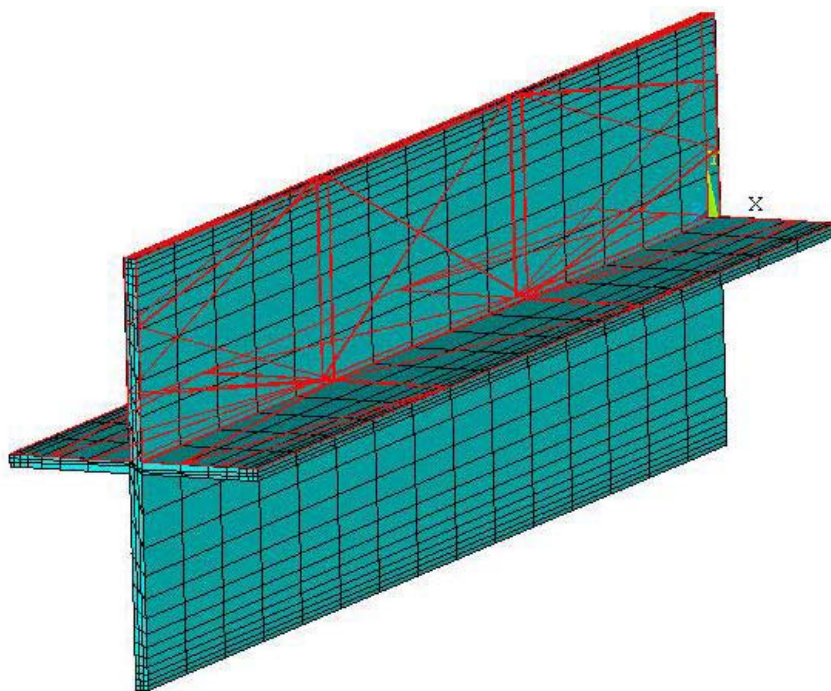


Рис. 3.25. Текущее изображение при задании условий на верхней поверхности

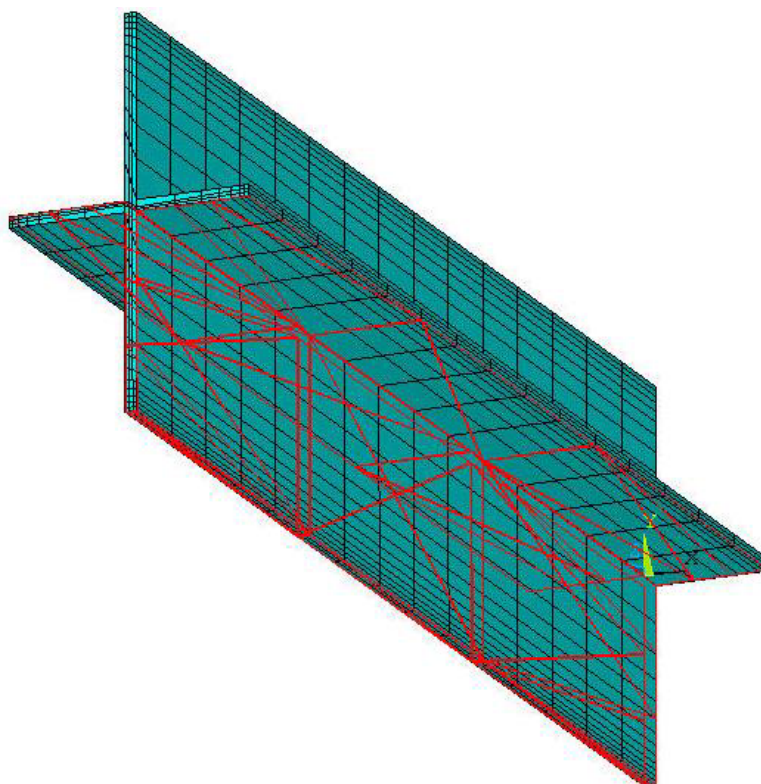


Рис. 3.26. Задание условий на нижней поверхности

9. Запустить решение задачи.

MAIN MENU→SOLUTION→ SOLVE→CURRENT LS→
(Просмотр информации **file→close.**)→**OK →close** (заккрыть сообщение о завершении решения).

10. Просмотр и фиксация результатов расчета.

Построить изображение полей температуры в виде изолиний.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS
→CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU→DOF SOLUTION,
Temperature TEMP→OK

Полученное на экране изображение показано на рис. 3.27.

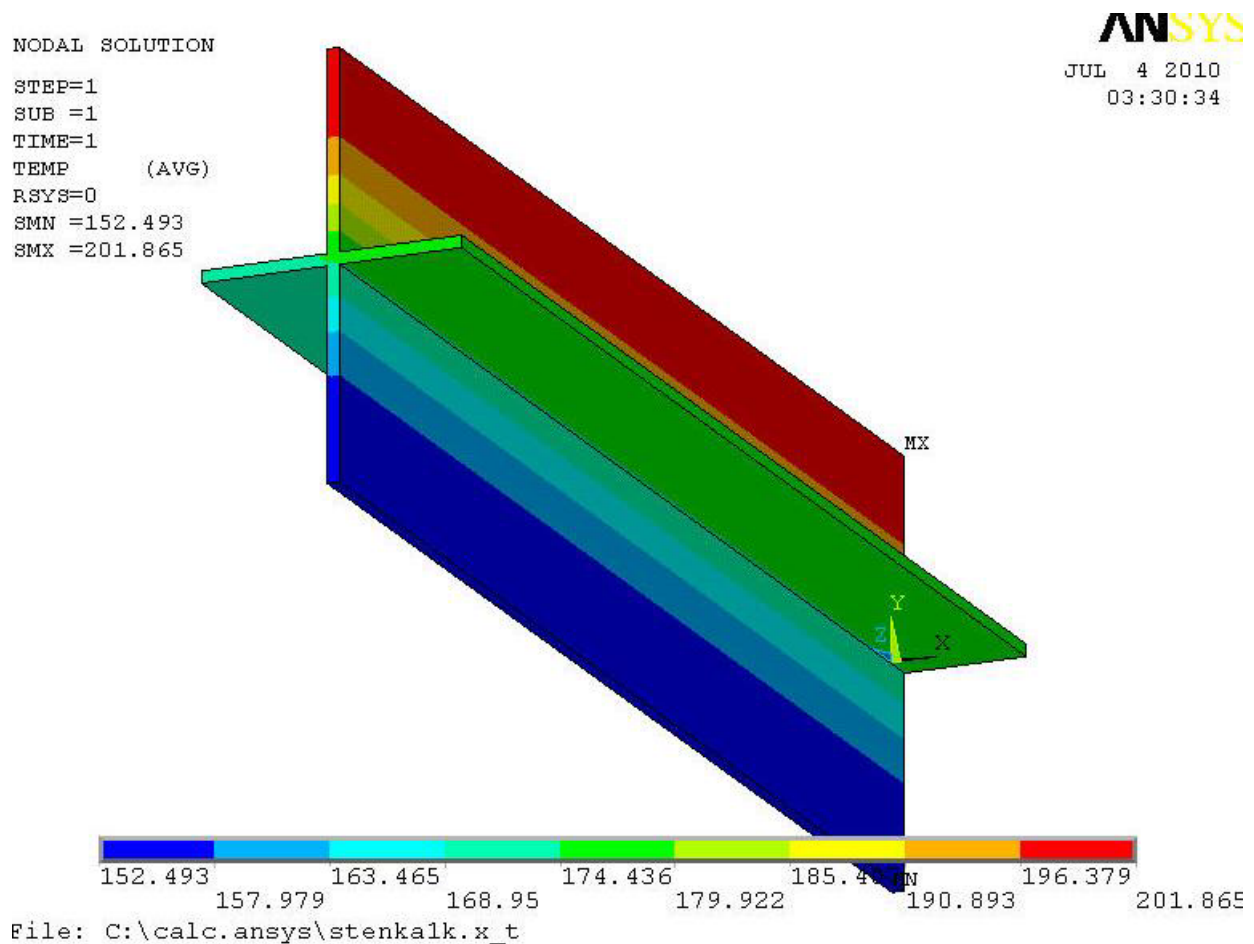


Рис. 3.27. Распределение температуры в стенке рекуператора

3.5. Нестационарный теплообмен. Нагрев пластины в печи с жидким теплоносителем

Постановка задачи

Металлическая пластина толщиной $h = 0,1$ м, имеющая температуру 25°C , опущена в соляную ванну с температурой 500°C . Определить изменение температуры по сечению пластины в течение 500 с. Считать, что температура верхней поверхности пластины равна 500°C , на нижней поверхности задать коэффициент теплоотдачи $\alpha_K = 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Выполнить визуализацию решения, построить необходимые графики. Теплопроводность материала пластины $\lambda = 27,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; плотность $\rho = 7610 \text{ кг}/\text{м}^3$; теплоемкость $c = 620 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Расчетная схема показана на рис. 3.28.

При решении задачи плита считается двумерной, ограниченной по ширине адиабатическими вертикальными плоскостями.

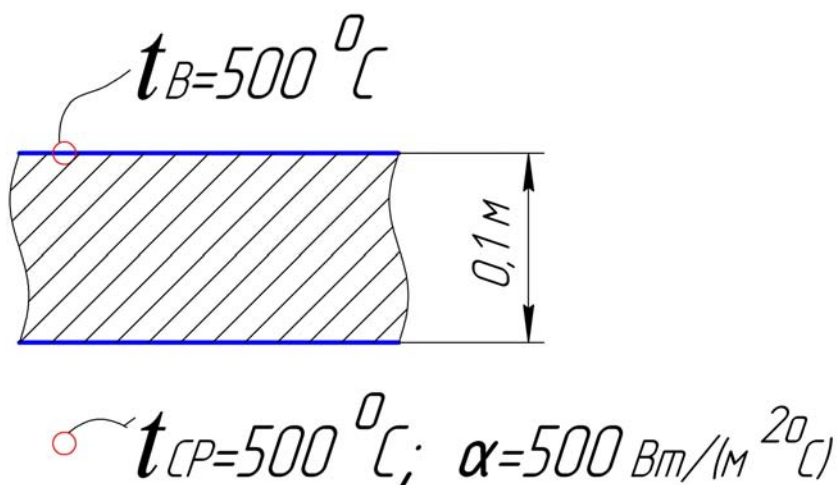


Рис. 3.28. Расчетная схема пластины

Порядок решения

1. Задание типа анализа.

MAIN MENU→**PREFERENCES**→**THERMAL**→**OK**

2. Задание системы единиц СИ. Ввести в окно ввода команд **/UNITS,SI**

3. Построение геометрической модели объекта.

Построить прямоугольник со сторонами 0,2 и 0,1 метра по осям **OX** и **OY**

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**MODELING**→**CREATE**
→**AREAS**→**RECTANGLE**→**BY 2 CORNERS**→**X=0, Y=0,**
Width=0.2, Height=0.1

4. Выбор типа конечного элемента.

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**ELEMENT**
TYPE→**Add/Edit/Delete**→**Add...**→**Thermal Mass Solid; Quad 4**
node 55→**OK**→**CLOSE**

5. Задание материала плиты.

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**MATERIAL PROPS**
→**MATERIAL MODELS**

Появится меню определения свойств материала. Далее двойным щелчком мыши выбрать

=>**THERMAL**=>**CONDUCTIVITY**=>**ISOTROPIC**

В окне определения теплопроводности ввести **KXX= 35**. Выбрать

=>**THERMAL**=>**DENSITY**, в поле **DENS** ввести 7610, затем

=>**THERMAL**=>**SPECIFIC HEAT**, в поле **C** ввести 620.

→**OK**→**Material**→**Exit**.

6. Построение конечно-элементной модели.

Задать средний размер граней конечных элементов

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**MESHING**→**SIZE CNTRL**
→**MANUAL SIZE**→**GLOBAL**→**SIZE**→Задать **SIZE** равной **0.005**
→**OK**

Наложить сетку

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**MESHING**→**MESH**→**AREAS**
→**FREE**→**PICK ALL**

В графическом окне появится объект с конечно-элементной сеткой (рис. 3.29).

7. Сохранение промежуточных результатов работы.

UTILITY MENU→**FILE**→**Save as Jobname**

8. Задание типа анализа.

MAIN MENU→**SOLUTION**→**ANALYSIS TYPE**→**NEW ANALYSIS**
→**TRANSIENT**→**OK**. В меню **Transient Analysis** выбрать **FULL**
→**OK**

9. Задание начальных условий.

MAIN MENU→**SOLUTION**→**DEFINE LOADS**→**APPLY**→**INITIAL**
CONDITION→**DEFINE**→ В появившемся меню выбрать **Pick**

АII. → В появившемся следующем меню выбрать Lab= **TEMP**, задать Value = **25** →**OK**

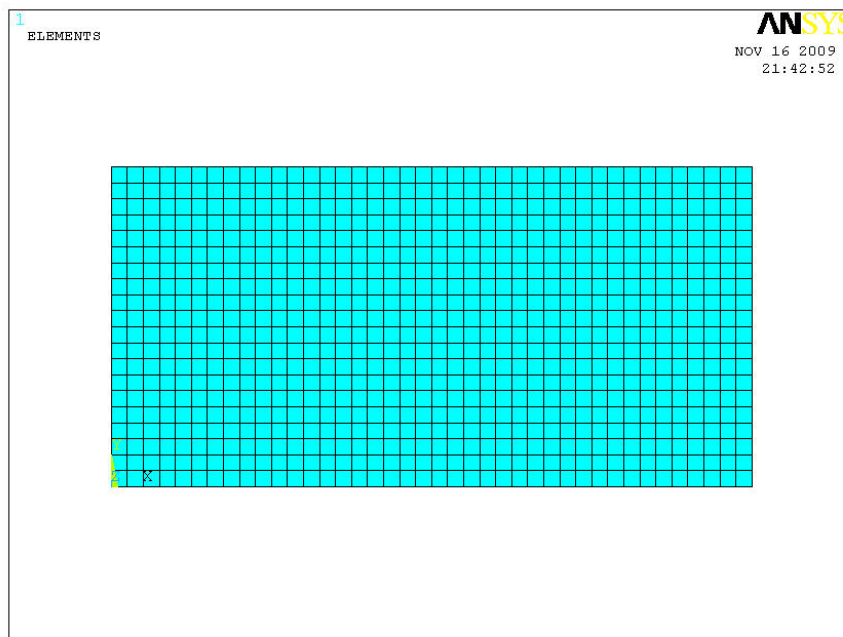


Рис. 3.29. Конечно-элементное разбиение объекта

10. Задание граничных условий.

На верхней поверхности задать постоянную температуру 500 °С.

MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY→THERMAL→TEMPERATURE→ On Lines

Появится меню «Apply TEMP». Щелчок курсором по верхней границе плиты, появится штриховая линия →**OK**, появится второе меню «Apply TEMP on lines». Задать Lab2= **TEMP**; VALUE= **500** →**OK**. На поверхности появятся треугольники, показывающие, что условия заданы.

На нижней поверхности задать конвективный тепловой поток.

MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY→THERMAL→ CONVECTION→On Lines

Щелчок курсором по нижней границе плиты – появится штриховая линия →**OK**.

Появится меню «Apply CONV on lines». В окна меню занести: SFL – **constant value**; VAL1.Film coefficient (коэффициент теплоотдачи) – **500**; SFL – **constant value**; VAL2I. Bulk temperature (температура среды) – **500**→**OK**. Появится предупреждение →**Close**. На верхней

поверхности появится стрелка, значит, условие задано. На боковых поверхностях условия не задавались, значит, эти поверхности адиабатические.

11. Задание параметров расчета.

MAIN MENU→SOLUTION→ LOAD STEP OPTS →TIME/FREQUENCY→Time-Time Step→ В меню ввести: **TIME=500** (в верхнее окно ввести общее время нагрева пластины); **KBC=stepped** (Ступенчатое изменение нагрузки. Если бы было задано **ramped**, нагрузка менялась бы постепенно и по прямой); **DELTIM=25** (шаг по времени для расчета полей параметров); **Minimum time step size = 10**; **AUTOTS = Prog Chosen** (шаг по времени выбирает ANSYS).

MAIN MENU→SOLUTION→ LOAD STEP OPTS →OUTPUT CTRLS→DB/Results File→ В поле **FREQ** задать **every substep** (записывать результаты каждого шага).

12. Запустить решение задачи.

MAIN MENU→SOLUTION→ SOLVE→CURRENT LS→ (Просмотр информации **file→close.**) **→OK →close.**

13. Просмотр и фиксация результатов расчета.

Изображение полей температуры в виде изолиний

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ PLOT RESULTS →CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU→DOF SOLUTION, Temperature TEMP→OK

Распределение температуры показано на рис. 3.30.

14. Анимация изменения полей температуры во времени.

UTILITY MENU→ PLOTCTRLS→STYLE→CONTOURS →Uniform Contours

Ввести данные в меню «Uniform Contours»: **WN= Window 1, NCONT= 9**, отметить позицию «User specified», **VMIN= 25, VMAX= 500**, отметить «Replot», **→OK.**

UTILITY MENU→ PLOTCTRLS→ ANIMATE→Over Time

Ввести данные в меню «Animate Over Time»: **20 frames**, флажок «Time Range», **20-500 Min & Max Time Range, Auto contour scaling OFF, DOF solution- TEMP →OK.**

Меняющиеся кадры распределений температуры показывают течение процесса во времени. Процесс анимации управляется кнопками меню «Animation Controller».

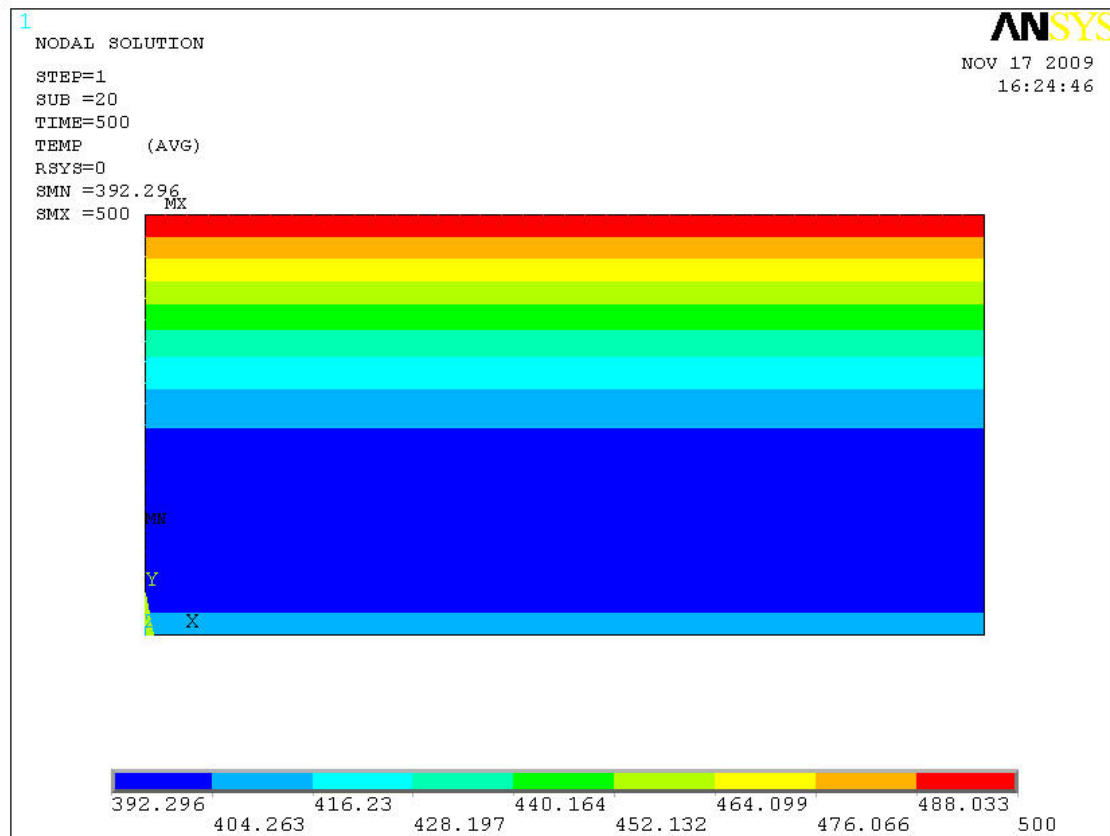


Рис.3.30. Распределение температуры по толщине пластины

15. Построение графиков изменения во времени локальных значений температуры.

MAIN MENU→**TimeHist Postpro** Появится меню «Time History Variables». В меню нажать на клавишу **Add** (добавить данные). Появится меню «Add Time-History Variables». В этом окне должна быть выбрана переменная, которая отобразится на графике. Выбрать **DOF Solution - Temperature**. В окне меню появится имя переменной **TEMP_2** →**OK**.

Появится меню «Node for Data». Курсором на изображении объекта на экране выбрать какую-либо точку, в которой будет отображаться температура. Выбран средний узел (в меню выбора появился номер узла № 491) →**OK** (в меню «Node for Data»). В меню «Time History Variables» в окне появится строка со второй переменной **TEMP_2** . Нажать на кнопку с изображением графика, на экране появится

график изменения во времени температуры в центре пластины (рис. 3.31). Открытое меню можно закрыть **UTILITY File→Close**.

Обозначение оси на рис. 3.31 целесообразно сменить **UTILITY MENU→PLOTCTRLS→STYLE→GRAPHS**

В меню «изменения осей для отображения» в окно «/AXLAB Y - метка оси» ввести **Temperature →OK**.

Перерисовать изображение **PLOT→Replot**. На экране появится скорректированный график (рис. 3.32).

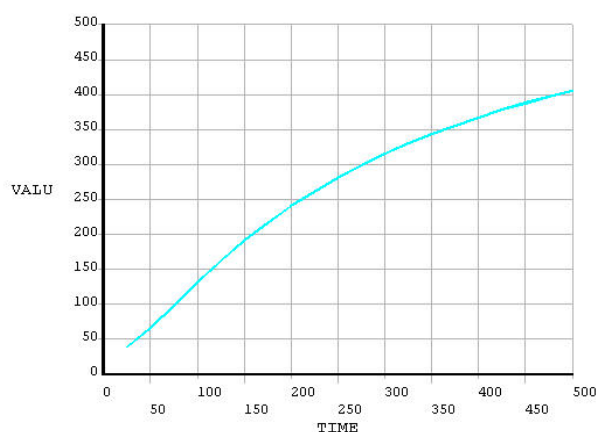


Рис.3.31. Изменение во времени температуры в центре пластины

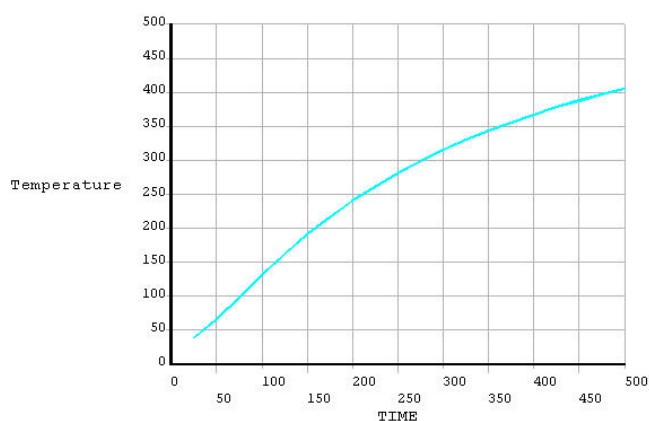


Рис. 3.32. График для температуры в центре пластины после коррекции

3.6. Нестационарный теплообмен. Нагрев в печи заготовки со слоем окалины на поверхности

Постановка задачи

Металлическая заготовка толщиной $h = 0,15$ м, имеющая температуру 20°C , симметрично нагревается сверху и снизу в течение 1 ч (3600 с). При этом тепловой поток к поверхностям возрастает линейно; суммарный коэффициент теплоотдачи конвекцией и излучением к стене от камеры печи в конце нагрева считается равным $500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, температура «печи», нагревающей стенку $t_{\text{п}} = 1300^\circ\text{C}$. Определить изменение температуры по сечению заготовки и перепад температуры в слое окалины толщиной $0,002$ м. Построить необходимые графики.

Теплопроводность материала заготовки $\lambda = 27,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; плотность $\rho = 7610 \text{ кг}/\text{м}^3$; теплоемкость $c = 620 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$; теплопроводность окалины $\lambda = 2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; плотность $\rho = 4000 \text{ кг}/\text{м}^3$; теплоемкость $c = 1000 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$. Расчетная схема показана на рис. 3.33.

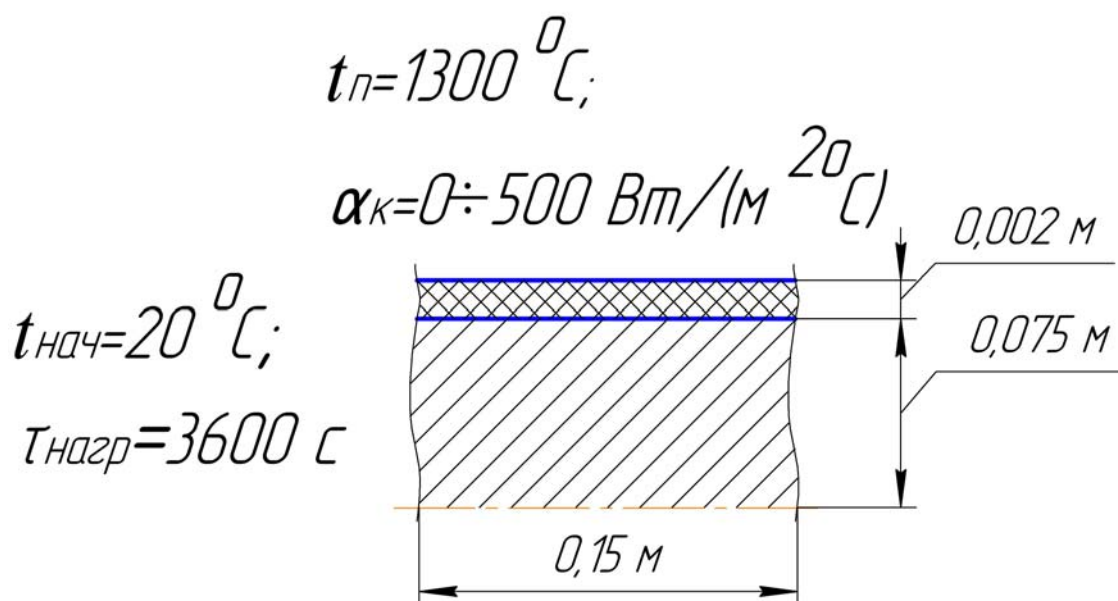


Рис. 3.33. Расчетная схема пластины

При решении задачи расчеты выполняются для половины толщины симметричной заготовки, которая для наглядности изображена двумерной, ограниченной снизу адиабатической плоскостью симметрии.

Порядок решения

1. Задание типа анализа.

MAIN MENU→PREFERENCES→THERMAL→OK

2. Задание системы единиц СИ. Ввести в окно ввода команд /UNITS,SI

3. Построение геометрической модели объекта.

Построить прямоугольник со сторонами 0,15 и 0,075 метра по осям **OX** и **OY**

MAIN MENU→PREPROCESSOR→MODELING→CREATE→AREAS→RECTANGLE→BY 2 CORNERS→X=0, Y=0, Width=0.15, Height=0.075

Построить прямоугольник со сторонами 0,15 и 0,002 метра по осям **OX** и **OY**

MAIN MENU →PREPROCESSOR →MODELING→CREATE →AREAS→ RECTANGLE→BY 2 CORNERS→X=0, Y=0,075, Width=0.15, Height=0.002

На экране появится прямоугольник, разделенный на 2 части в соответствии с рис. 3.33.

4. Объединение группы тел в единую составную стену.

MAIN MENU→PREPROCESSOR→MODELING→OPERATE→BOOLEANS→GLUE→AREAS → Pick all

Это перенумерует области. Можно проверить номера поверхностей **UTILITY MENU→PLOTCTRLS→ NUMBERING→** Установить флажок **Area**. В окне **Replot – Replot→ OK**. На поверхностях появились номера **A1, A3** (рис. 3.34).

5. Выбор типа конечного элемента.

MAIN MENU →PREPROCESSOR→ ELEMENT TYPE →Add/Edit/Delete→ Add...→ Thermal Mass Solid; Quad 4node55→ OK→CLOSE

6. Задание материала заготовки.

Задаются свойства металла.

**MAIN MENU → PREPROCESSOR → MATERIAL PROPS
→ MATERIAL MODELS**

Появится меню определения свойств материала № 1. Далее двойным щелчком мыши выбрать

=> THERMAL=> CONDUCTIVITY => ISOTROPIC

В окне определения теплопроводности ввести $K_{XX} = 27,5$. Выбрать

=> THERMAL=> DENSITY, в поле **DENS** ввести 7610, затем

=> THERMAL=> SPECIFIC HEAT, в поле **C** ввести 620.

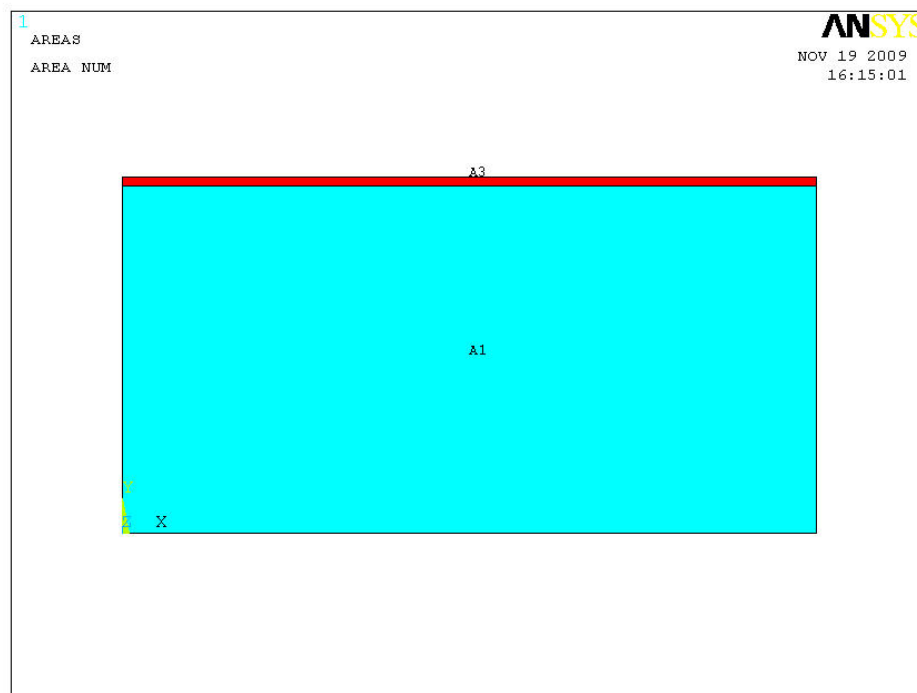


Рис. 3.34. Результат нумерации областей модели

Задать свойства окалины.

**MAIN MENU → PREPROCESSOR → MATERIAL PROPS
→ MATERIAL MODELS**

В меню: **MATERIAL → New Model**. В меню определения номера материала ввести **3** (в соответствии со схемой рис. 3.34). Слева появится надпись **Модель Материала 3**. Далее

=> THERMAL=> CONDUCTIVITY=> ISOTROPIC

В окне определения теплопроводности ввести $K_{XX} = 2$. Выбрать

=> THERMAL=> DENSITY, в поле **DENS** ввести 4000, затем

=> THERMAL=> SPECIFIC HEAT, в поле **C** ввести 1000.

→ OK → Material → Exit.

7. Построение конечно-элементной модели.

Слой окаины имеет малую толщину, и в нем при расчете теплообмена целесообразно использовать конечные элементы значительно меньшего размера, чем в заготовке. Сетку переменного размера удобно создавать, задавая разный размер элементов вдоль линий.

Задать отображение номеров линий на объекте.

UTILITY MENU→PLOTCTRLS→ NUMBERING→ Установить флажок **Line**. В окне **Replot Replot→ OK**. На поверхностях появятся номера линий **L1-L10** (рис. 3.35).

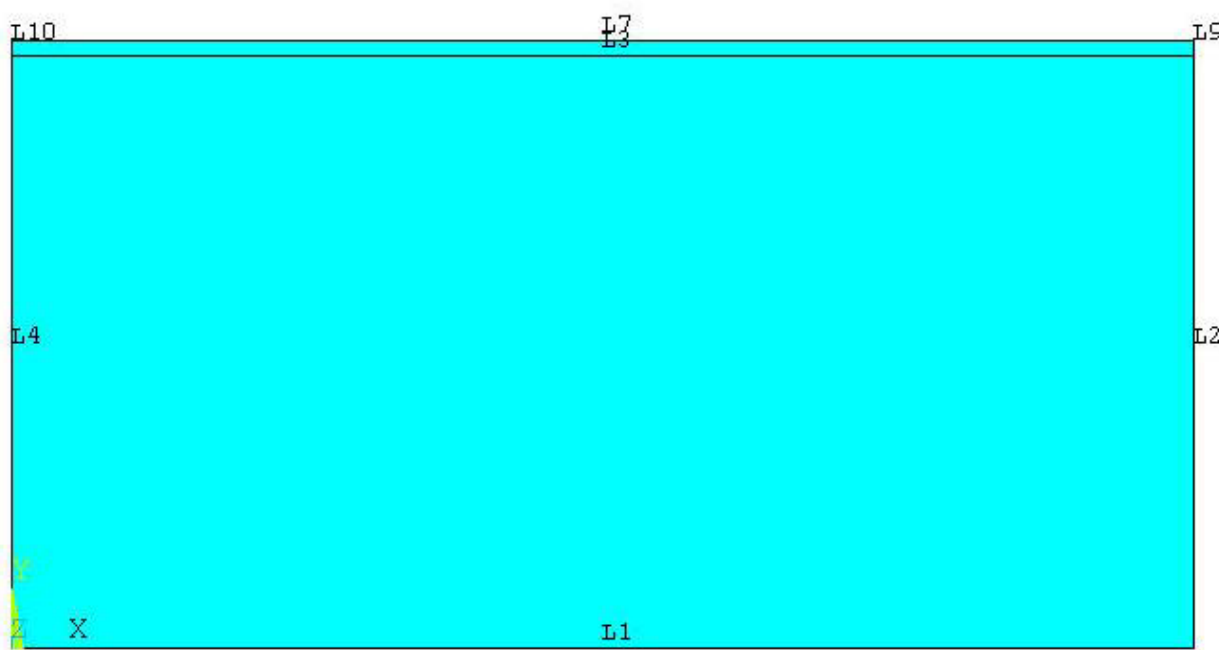


Рис. 3.35. Нумерация линий модели

Задать одинаковый размер конечных элементов вдоль линий L1, L2, L3, L4, L7, равный 0,01.

MAIN MENU→PREPROCESSOR→MESHING→SIZE CNTRLS→MANUAL SIZE→LINES→Picked Lines. Выбрать курсором линии с указанными выше номерами, →**Apply**. В меню ввести в поле «**SIZE**» длину ребер элементов **0.01** →**OK**.

Задать одинаковый размер конечных элементов вдоль линий L9 и L10, равный 0,0005.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → SIZE CNTRLS → MANUAL SIZE → LINES → Picked Lines. Выбрать курсором линии с номерами L9 и L10 → **Apply.** В меню ввести в поле «SIZE» длину ребер элементов **0.0005 → OK.**

Наложение сетки.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → MESH → AREAS → FREE → PICK ALL

В графическом окне появится объект с конечно-элементной сеткой, часть которого показана на рис. 3.36.

8. Сохранение промежуточных результатов работы.

UTILITY MENU → FILE → Save as Jobname

9. Закрепление свойств материалов за частями составного объекта.

Закрепить свойства материала 1 за поверхностью 1.

UTILITY MENU → SELECT → ENTITIES

В меню **Select Entities** в верхнем окне выбрать → **Areas**, в окне ниже должно быть → **By Num/Pick → OK.** Появится меню **Select areas**, в окно которого ввести цифру **1 → OK.**

UTILITY MENU → SELECT → ENTITIES

В меню **Select Entities** в верхнем окне выбрать → **Elements**, в окне, где было **By Num/Pick**, выбрать **Attached to**, затем ниже выбрать → **Areas → OK.**

Обновить изображение.

UTILITY MENU → PLOT → Replot. На экране появится изображение части заготовки без участка окалины.

В окно команд ввести **mpchg,1,all → ENTER**

Закрепить свойства материала 3 за поверхностью 3. Повторить все операции предыдущего пункта с поверхностью № 3 (вместо **1** ввести

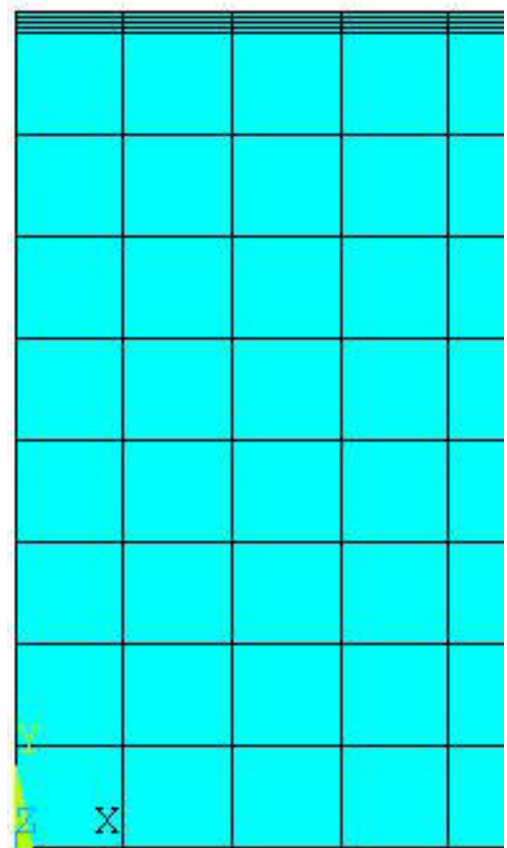


Рис. 3.36. Конечно-элементное разбиение объекта

цифру 3). На экране появится отдельное изображение участка поверхности окалины.

Восстановить на экране изображение всех поверхностей.

UTILITY MENU→SELECT→Everything

UTILITY MENU→PLOT→Replot

10. Вывод изображения, контролирующего правильность выполненных процедур.

UTILITY MENU→PLOTCTRLS→NUMBERING→ Установить флажок **Elements→APPLY**. В окне **Attrib numbering** выбрать **Material number →OK**. На экране появится фрагмент изображения составной заготовки (рис. 3.37), части которого выделены цветом и содержат номера присвоенных им моделей материалов.

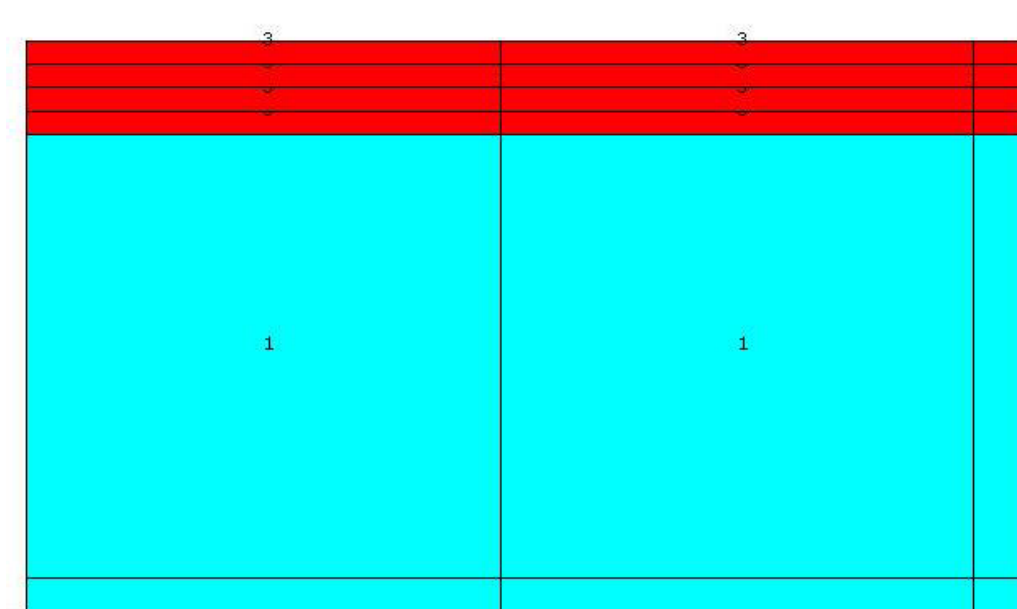


Рис. 3.37. Модель после присвоения номеров материалов

11. Задание типа анализа.

MAIN MENU→SOLUTION→ANALYSIS TYPE→NEW ANALYSIS→TRANSIENT→OK. В меню **Transient Analysis** выбрать **FULL→OK**

10. Задание начальных условий.

MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY→INITIAL CONDIT'N→DEFINE→ В появившемся меню

выбрать **Pick All.** → В следующем меню выбрать **Lab= TEMP** , задать **Value= 20** →**OK**

11. Задание граничных условий.

На верхней поверхности задать конвективный тепловой поток.

**MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY
→THERMAL→ CONVECTION→On Lines**

Щелчок курсором по верхней границе объекта – появится штриховая линия →**OK**.

В окна меню «Apply CONV on lines» занести: **SFL – constant value**; **VAL1.Film coefficient** (коэффициент теплоотдачи) – **500**; **SFL – constant value**; **VAL2I. Bulk temperature** (температура среды) – **1300**→**OK**. Если появится предупреждение, то указать →**Close**. На верхней поверхности появилась стрелка, значит, условие задано. На боковых и нижней поверхностях условия не задавались, значит, эти поверхности адиабатические.

12. Задание параметров расчета.

**MAIN MENU→SOLUTION→ LOAD STEP OPTS
→TIME/FREQUENC→Time-Time Step→** В меню ввести: **TIME = 3600** (общее время нагрева пластины); **KBC = ramped** (нагрузка меняется постепенно и по прямой); **DELTIM = 200** (шаг по времени для расчета полей параметров); «Minimum time step size» = 50; **AUTOTS = Prog Chosen** (шаг по времени выбирает ANSYS).

**MAIN MENU→SOLUTION→LOAD STEP OPTS→OUTPUT
CTRLS→DB/Results File→** В поле **FREQ** задать **every substep** (записывать результаты каждого шага)

13. Запустить решение задачи.

MAIN MENU→SOLUTION→ SOLVE→CURRENT LS→ (Просмотр информации **file→close.**)→**OK** →**close** (выбрать в сообщении о завершении решения).

14. Просмотр и фиксация результатов расчета.

- Изображение полей температуры в виде изолиний.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS
→CONTOUR PLOT→NODAL SOLU→DOF SOLUTION,
Temperature TEMP→OK**

Поле температуры показано на рис. 3.38.

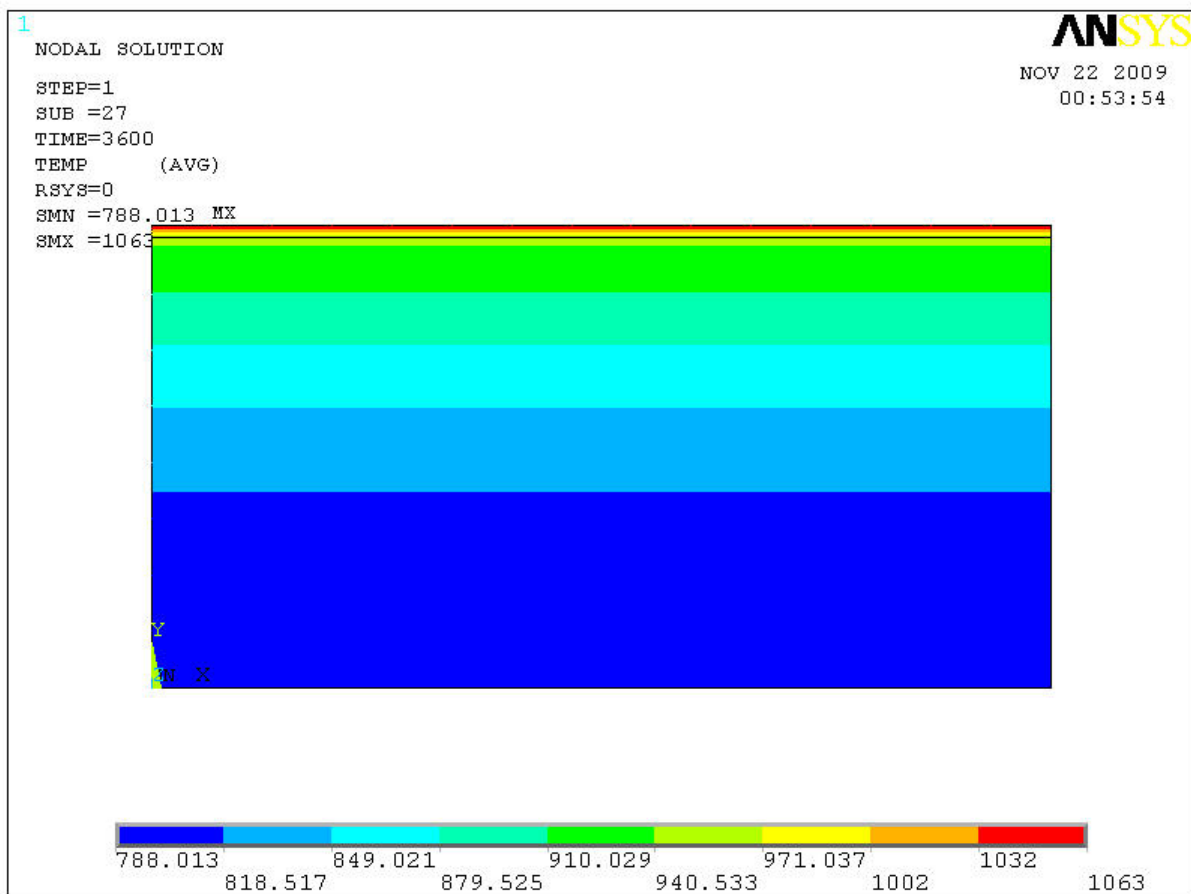


Рис. 3.38. Поле температуры в пластине

○ Распределение температуры по сечению заготовки в конце нагрева.

Задать путь 1 для построения графика распределения проекции теплового потока на ось Y.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ PATH OPERATIONS→DEFINE PATH→BY NODES

Курсором выделить два узла на верхней и нижней границах объекта →**OK**→ пути присвоить имя **TEMP1** →**OK**.

Определить параметр, который должен выводиться на график.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC →PATH OPERATIONS→MAP ONTO PATH (отобразить вдоль пути) → в меню выбрать **DOF Solution, Temperature TEMP**, у переменной **/PBC** поставить отметку **YES** →**OK**.

Построить график
MAIN MENU→**GENERAL POSTPROC** →**PATH OPERATIONS**
 →**PLOT PATH ITEM** (отобразить пункт пути) →**ON GRAPH**
 В меню выбрать параметр **TEMP** →**OK**. На графическом экране
 появится график рис.3.39.

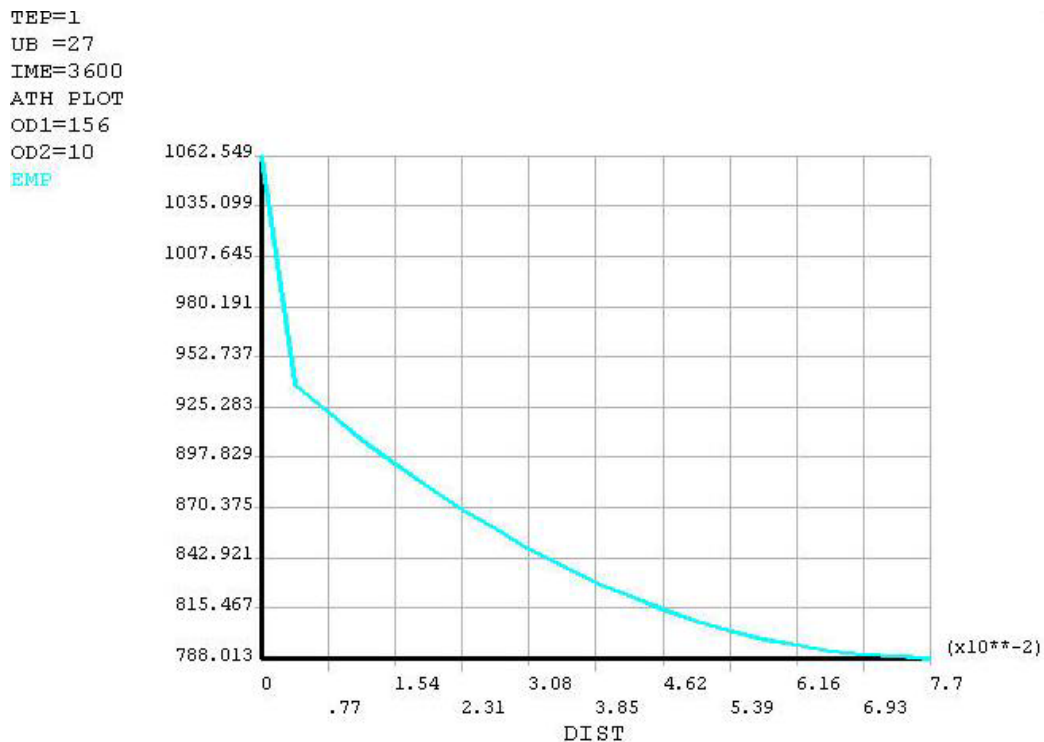


Рис. 3.39. Распределение температуры по сечению пластины

○ Построение графиков изменения во времени значений температуры на поверхности и на границе «металл-окалина».

MAIN MENU→**TimeHist Postpro** Появится меню «Time History Variables». В меню нажать клавишу **Add** (добавить данные). Появится меню «Add Time-History Variables». В этом окне должна быть выбрана переменная, которая отобразится на графике. Выбрать **DOF Solution - Temperatute**. В окне меню появится имя переменной **TEMP_2** →**OK**.

В меню «Node for Data» курсором выбрать точку на поверхности заготовки, в которой будет отображаться температура (на изображении объекта на экране) →**OK**. В меню «Time History Variables» в окне появится строка со второй переменной **TEMP_2**. Снова нажать на клавишу **Add**. В меню «Add Time-History Variables»

выбрать **DOF Solution – Temperatute**, в окне имя переменной **TEMP_3 →OK**.

Появится меню «Node for Data». Курсором выбрать точку на границе металл – окалина →**OK**. Выделить строки с переменными TEMP 2 и TEMP 3, как это показано на рис. 3.40. Нажать на кнопку с изображением графика, на экране появится график с двумя кривыми изменения во времени температур на поверхности и под окалиной (рис. 3.41). Открытое меню можно закрыть **UTILITY File→Close**.

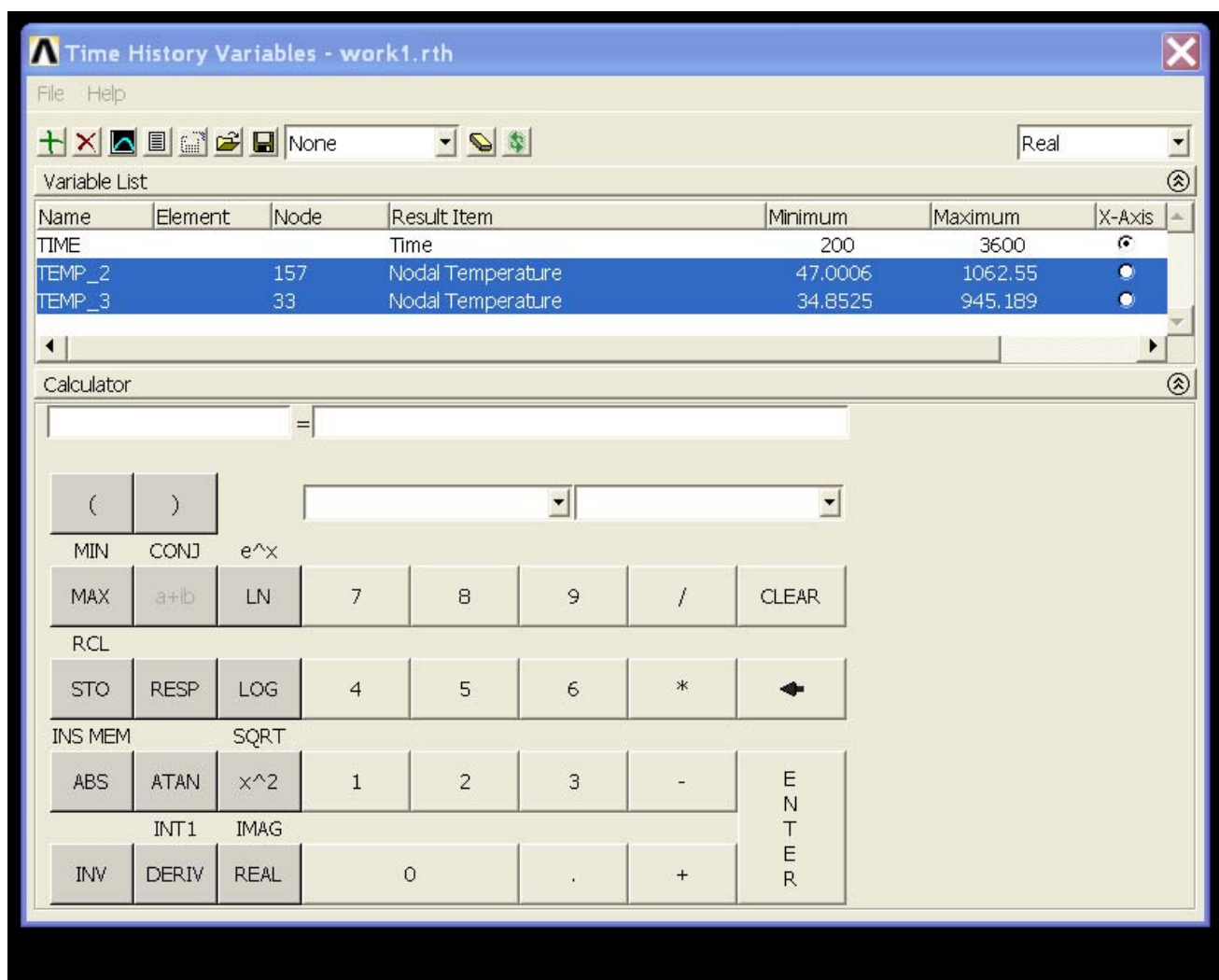


Рис. 3.40. Вид вкладки «Time History Variables»

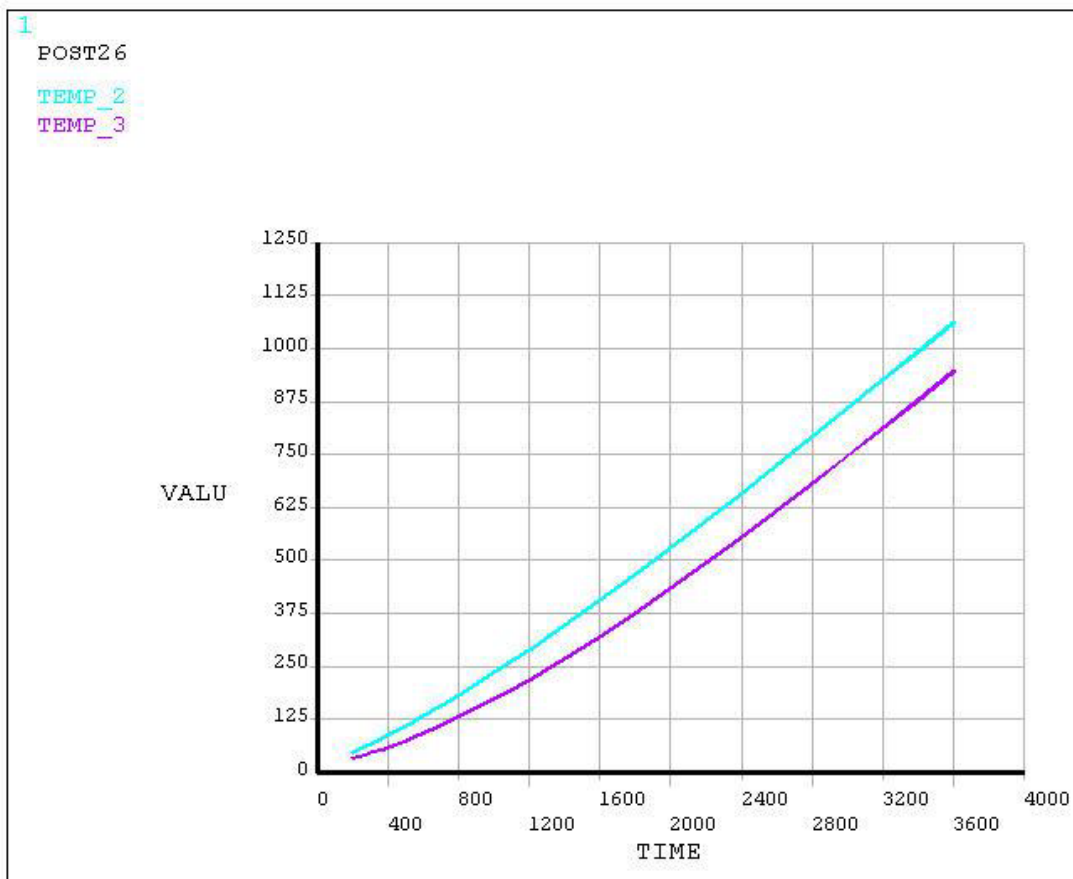


Рис. 3.41. Изменение во времени температуры металла на поверхности и температуры под слоем окалины

3.7. Нестационарный теплообмен. Нагрев пластины по заданному режиму с переменной во времени нагрузкой

Постановка задачи

Металлическая пластина толщиной $h = 0,1$ м, имеющая температуру 25°C , нагревается по графику, показанному ниже.

Время от начала нагрева, с	380	500	700
Температура поверхностей, $^{\circ}\text{C}$	500	900	1200

Определить изменение температуры в центре пластины в течение 1200 с.

Теплопроводность материала пластины $\lambda = 27,5 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$, плотность $\rho = 7610 \text{ кг/м}^3$, теплоемкость $c = 620 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$. Расчетная схема пластины показана на рис. 3.28.

Порядок решения

Выполнить действия, описанные в пунктах 1-9 подгл. 3.5.

10. Задание граничных условий.

На верхней и нижней поверхностях задается график изменения температуры.

MAIN MENU → SOLUTION → DEFINE LOADS → APPLY → THERMAL → TEMPERATURE → On Lines

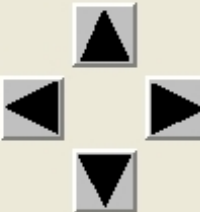
Появилось меню «Apply TEMP». Щелчок курсором по верхней, затем по нижней границе плиты – появляются штриховые линии → **OK**. Появится второе меню «Apply TEMP on lines». Задать Lab2 = **TEMP**; «Apply as» – **NEW Table** → **OK**. В новом меню: «Name of new table» – **TEMPOV** → **OK**. Следующее меню: в таблице задать **I, J, K = 3, 1, 1** → **OK**. В меню «Table Array» – заполнить таблицу в соответствии с рис. 3.42 (здесь в левой колонке – время, в правой – соответствующие значения температуры поверхности). На поверхностях появятся треугольники, показывающие, что условия на границах заданы.

Table Array: TEMPOV = f(Row,Column,Plane)

File Help

Page

Full Page ▾



	0
380	500
500	900
700	1200

Row

Рис. 3.42. Вкладка «Table Array»

11. Задание параметров расчета.

MAIN MENU→SOLUTION→LOAD STEP OPTS→TIME/FREQUENCY→Time-Time Step→ В меню ввести: **TIME = 700** (в верхнее окно вводится общее время нагрева пластины); **KBC = stepped** (ступенчатое изменение нагрузки. Если бы было задано **ramped**, то нагрузка менялась бы постепенно и по прямой); **DELTIM = 25** (шаг по времени для расчета полей параметров); «Minimum time step size» = 10; **AUTOTS = Prog Chosen** (шаг по времени выбирает ANSYS).

MAIN MENU→SOLUTION→LOAD STEP OPTS→OUTPUT CTRLS→DB/Results File→ В поле **FREQ** задать **every substep** (записывать результаты каждого шага).

12. Запустить решение задачи.

MAIN MENU→SOLUTION→ SOLVE→CURRENT LS→ (Просмотр информации **file→close.**)→**OK →close** (закрывать сообщение о завершении решения).

13. Построение изображения полей температуры в виде изолиний.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS→CONTOUR PLOT→NODAL SOLU→DOF SOLUTION, Temperature TEMP→OK

Изображение показано на рис. 3.43.

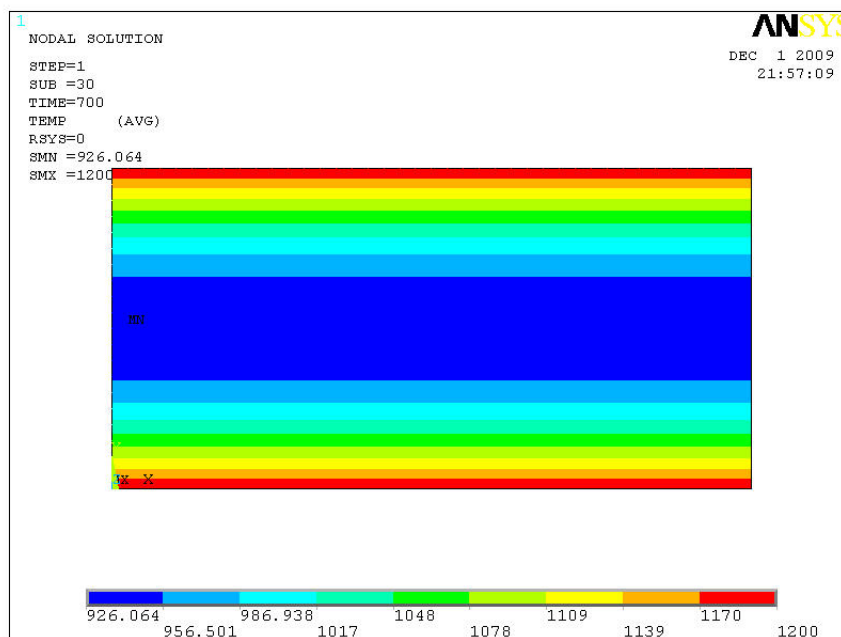


Рис. 3.43. Распределение температуры в пластине

14. Построение графиков изменения во времени значений температуры на поверхности и в центре пластины.

MAIN MENU→TimeHist Postpro

Появится меню «Time History Variables». В меню нажать клавишу **Add** (добавить данные). В меню «Add Time-History Variables» должна быть выбрана переменная, которая отобразится на графике. Выбрать **DOF Solution - Temperatute**. В окне меню появится имя переменной **TEMP_2** →**OK**.

В меню «Node for Data» курсором выбрать точку на поверхности заготовки (на изображении объекта в графическом окне), в которой будет отображаться температура →**OK**. В меню «Time History Variables» в окне появится строка со второй переменной **TEMP_2**. Снова нажать клавишу **Add**. В меню «Add Time-History Variables» выбрать **DOF Solution – Temperatute**, в окне имя переменной **TEMP_3** →**OK**. Появится меню «Node for Data». Курсором выбрать точку в центре пластины →**OK**. Выделить строки с переменными TEMP 2 и TEMP 3, как это показано на рис. 3.44.

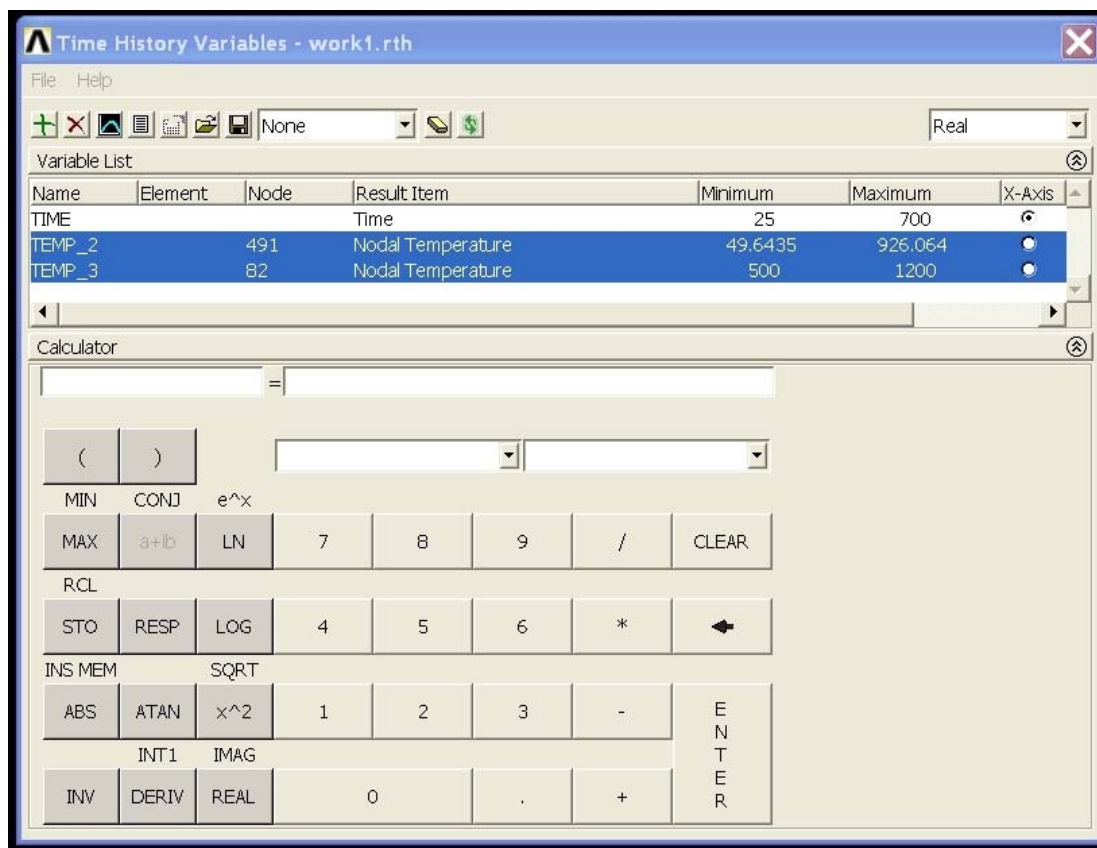


Рис. 3.44. Графический экран при построении зависимостей температуры от времени

Нажать кнопку с изображением графика, на экране появится график с двумя кривыми изменения во времени температур на поверхности и под окалиной (рис. 3.45). Открытое меню можно закрыть **UTILITY File→Close**.

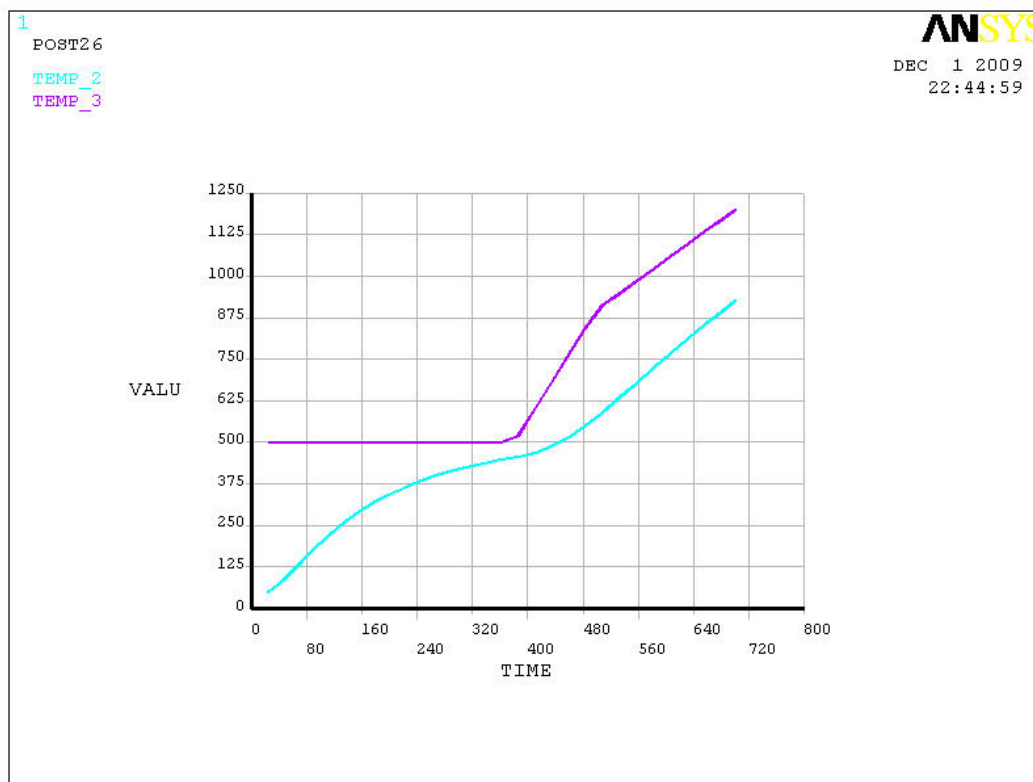


Рис. 3.45. Изменение во времени температур металла

3.8. Вариант задачи нестационарного теплообмена при нагреве пластины по заданному режиму

Постановка задачи

Для сравнения вариантов задания графика нагрева пластины в таблице исходных данных сделано небольшое изменение:

Время от начала нагрева, с	0	380	500	700
Температура поверхностей, °C	200	500	900	1200

Остальные данные приведены в подглаве 3.7. Определить изменение поля температуры в пластине.

Порядок решения

Выполнить действия, описанные в пунктах 1–9 подглавы 3.5.

10. Задание граничных условий.

На верхней и нижней поверхностях пластины задается график изменения температуры.

MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY→THERMAL→TEMPERATURE→On Lines

Появится меню «Apply TEMP». Щелчок курсором по верхней, затем по нижней границе плиты – появятся штриховые линии →**OK**. Появится второе меню «Apply TEMP on lines». Задать Lab2 = **TEMP**; «Apply as» – **NEW Table** →**OK**. В новом меню: «Name of new table» – **TEMPOV** →**OK**. Следующее меню: в таблице задать **I,J,K = 4,1,1** →**OK**. В меню «Table Array» заполнить таблицу в соответствии с рис. 3.46 (в левой колонке – время, в правой – соответствующие значения температуры поверхности). На поверхностях появятся треугольники, показывающие, что условия на границах заданы.

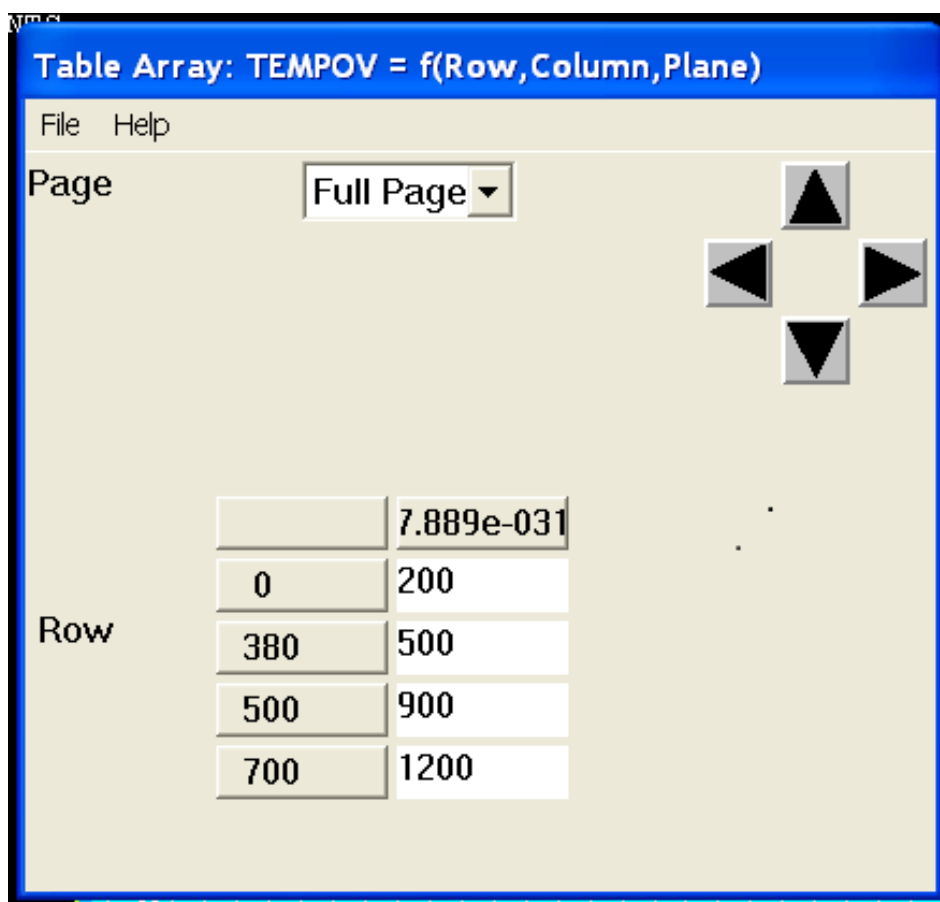


Рис. 3.46. Ввод данных в окна вкладки «Table Array»

11. Задание параметров расчета.

MAIN MENU→SOLUTION→ LOAD STEP OPTS →TIME/FREQUENCY→Time-Time Step→ В меню ввести: TIME = **700** (в верхнее окно ввести общее время нагрева пластины); KBC = **ramped**. Дальнейшие текст и последовательность решения задачи соответствуют подглаве 3.7. Полученные в расчете изолинии температуры и график с кривыми изменения во времени температур на поверхности и под окалиной показаны на рис. 3.47 и рис. 3.48.

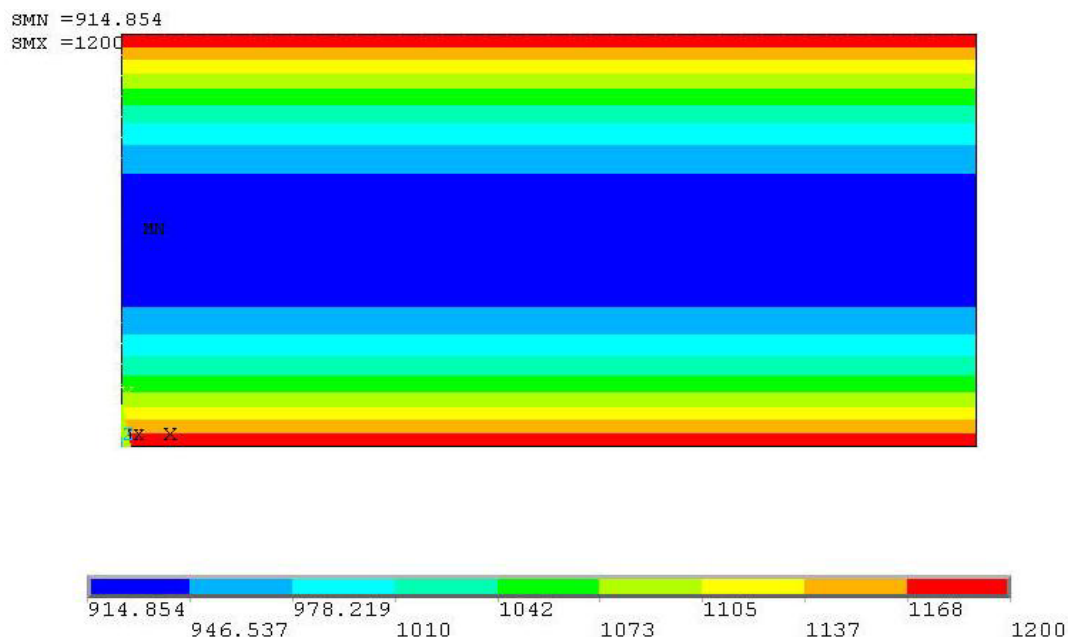


Рис. 3.47. Распределение температуры по сечению пластины в конце нагрева

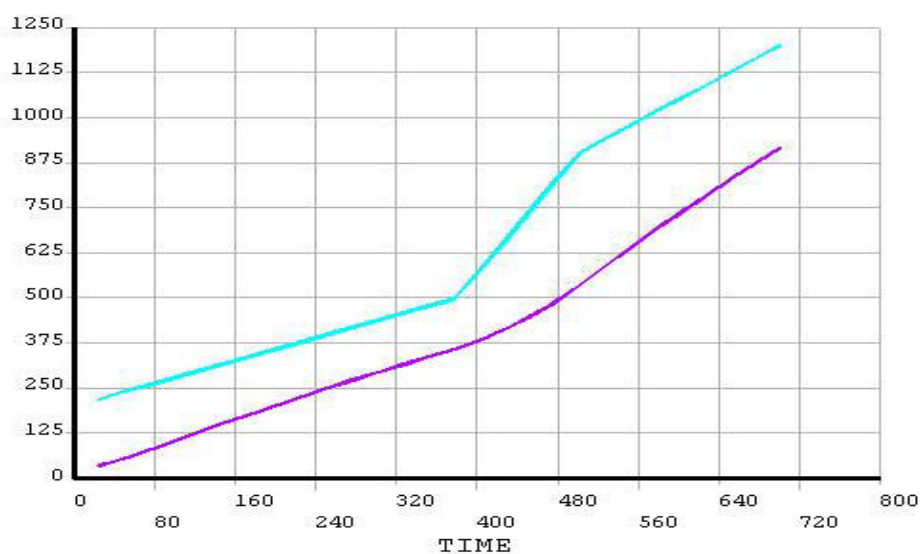


Рис. 3.48. Изменение во времени температуры пластины на поверхности и под окалиной

3.9. Стационарный теплообмен в пластине, поверхности которой нагреваются излучением

Постановка задачи

Металлическая пластина толщиной $h = 0,1$ м нагревается сверху излучающей средой, имеющей степень черноты 0,8 и температуру $t_b = 800$ °С. Излучающая среда под пластиной имеет степень черноты 0,8 и температуру 200 °С. Определить распределение температуры в пластине. Теплопроводность материала пластины $\lambda = 27,5$ Вт/(м·°С), плотность $\rho = 7610$ кг/м³, теплоемкость $c = 620$ Дж/(кг·К). Для наглядности представления результатов расчета пластина считается двумерной, ограниченной по ширине адиабатическими вертикальными плоскостями.

Порядок решения

Выполнить действия, описанные в пунктах 1-7 подглавы 3. 5.

8. Выбор типа конечного элемента с «радиационным эффектом» для поверхностей пластины (задать элемент SURF151)

MAIN MENU → PREPROCESSOR → ELEMENT TYPE → Add/Edit/Delete → Add... → Surface Effect; 2D thermal 151 → OK → CLOSE

9. Задать некоторый пространственный узел для имитации излучающей среды, окружающей пластину

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MODELING → CREATE → NODES → On Working Plane

Появится меню «Create Nodes on WP». Щелчок курсором выше пластины в произвольной точке. На поверхности появится обозначение узла, а в меню – координаты узла → **OK**. Появится номер узла (№ 862).

10. Генерация (наложение) на поверхности пластины сетки элементов (SURF151) с «поверхностным эффектом».

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MODELING → CREATE → ELEMENTS → Surf/Contact → Surf Effect → General Surface → Extra Node

Щелчок по ранее выбранному узлу (№ 862) на изображении в графическом окне → **OK → OK**

11. Задание граничных условий.

- На верхней поверхности

**MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY
→THERMAL→RADIATION → On Lines**

Щелчок курсором по верхней границе пластины – появится штриховая линия →**OK**. Во втором меню задать степень черноты верхней поверхности Emissivity – **0.8**; присвоить номер открытой полости, излучающей на верхнюю поверхность объекта, Enclosure number - **1** →**OK**. Над верхней поверхностью появится стрелка, показывающая, что граничное условие задано.

- На нижней поверхности

**MAIN MENU→SOLUTION→DEFINE LOADS→APPLY
→THERMAL→ RADIATION →On Lines**

Щелчок курсором по нижней границе пластины – появится штриховая линия →**OK**.

В меню задать Emissivity – **0.8**; номер полости, излучающей на нижнюю поверхность, Enclosure number – **2** →**OK**. Стрелка показывает, что граничное условие задано. На боковых поверхностях условия не задавались, значит, эти поверхности адиабатические.

12. Параметры, определяющие радиационный теплообмен на верхней поверхности.

MAIN MENU→SOLUTION→ RADIATION OPTS →SOLUTION OPT. В меню «Radiation Solution Options» задать: постоянную Стефана–Больцмана [STEF] Stefan-Boltzmann Const. - **5.67E-8**; температурную разницу между нулем и шкалой Цельсия [TOFFST] – **273**; Space опцию [SPCTEMP/SPCNOD] – **Temperature**; температуру среды, излучающей на верхнюю поверхность Value – **800** (в градусах Цельсия); Enclosure option – **Define**; номер полости над объектом Encl. number – **1** →**OK**.

Условия на нижней поверхности:

MAIN MENU→SOLUTION→ RADIATION OPTS →SOLUTION OPT. В меню задать [STEF] – **5.67E-8**; [TOFFST] – **273**; [SPCTEMP/SPCNOD] – **Temperature**; Value – **200**; Enclosure option – **Define**; номер полости над объектом Encl. number – **2** →**OK**.

13. Запустить решение задачи.

MAIN MENU→SOLUTION→ SOLVE→CURRENT LS→
(Просмотр информации: **file→close.**)→**OK** →**close** (закрывать сообщение о завершении решения).

14. Просмотр и фиксация результатов расчета.

- Изображение полей температуры в виде изолиний.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ PLOT RESULTS
→CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU→DOF SOLUTION,
Temperature TEMP→OK**

Изображение показано на рис. 3.49.

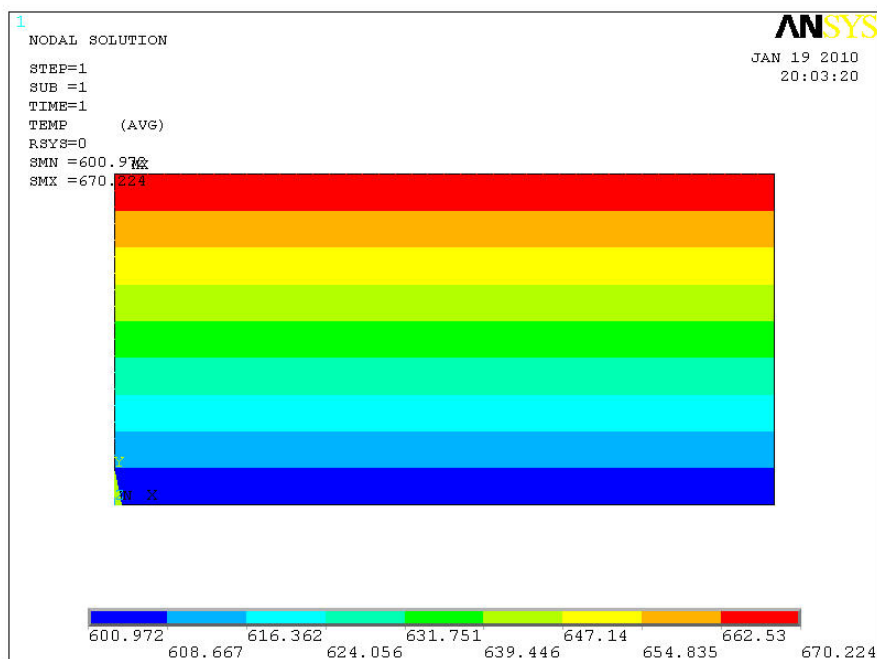


Рис. 3.49. Поле температуры в пластине

- Изображение поля векторов теплового потока.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ PLOT RESULTS
→VECTOR PLOT→ PREDEFINED**

В меню **Item Vector to be plotted** в левом окне выбрать **Flux & gradient**, в правом – **Thermal flux TF** (тепловой поток) →**OK**.

Распределение суммарного теплового потока в векторном виде показано на рис. 3.50.

Проверка результатов решения

Описания решений типовых задач радиационного теплообмена, выполненных в командах GUI ANSYS, в литературных источниках и Интернете не найдены. Решения, полученные командным методом, имеются в разделе Help программы – «Verification Manual» (задачи

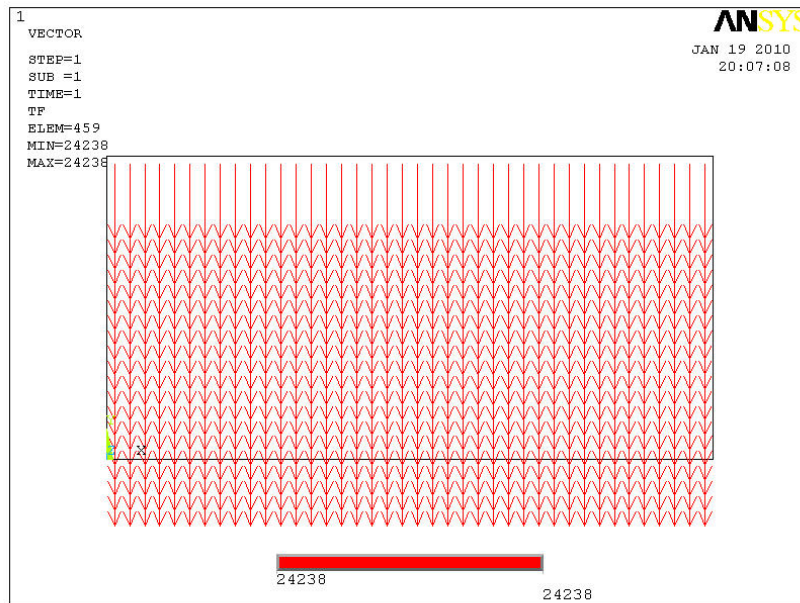


Рис.3.50. Поле векторов теплового потока в пластине

VM106, VM107, VM125, VM147, VM199, VM227, VM228). Однако эти решения не имеют достаточно подробных пояснений к выполняемым операциям. Алгоритм решения задачи, представленный в начале подглавы 3.9, составлялся частично путем перебора и проверки результатов всех возможных действий. Поэтому его необходимо проверить дополнительно ручным просчетом задачи.

1. Из рис. 3.49 и 3.50 получены следующие данные задачи: $t_B = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{MB} = 670,224 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_{MH} = 600,972 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_H = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $q_B = q_H = 24\,238 \text{ Вт/м}^2$. Из описания методики расчетов в ANSYS следует, что расчетные значения величин q_B и q_H должны приблизительно равняться, Вт/м^2 ,

$$q_B = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(800 + 273)^4 - (670,224 + 273)^4] = 24224,19;$$

$$q_H = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot [(600,972 + 273)^4 - (200 + 273)^4] = 24194,0.$$

Значения q_B и q_H близки к значениям, показанным на рис. 3.50, а их отличия могут объясняться особенностями отображения данных.

2. Задачу излучения можно заменить задачей с эквивалентным переносом тепла конвекцией. Тогда коэффициент теплоотдачи конвекцией к верхней поверхности $\alpha_{K,B}$ должен равняться

$$\alpha_{K,B}(800 - 670,224) = 24\,238;$$

$$\alpha_{K.B} = 24238:(800 - 70,224) = 186,768 \text{ Вт/м}^2.$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией к нижней поверхности $\alpha_{K.H}$

$$\alpha_{K.H}(600,972 - 200) = 24\,238;$$

$$\alpha_{K.H} = 24238/(600,972 - 200) = 60,448 \text{ Вт/м}^2.$$

При решении задачи конвективного нагрева с заданными значениями

$$t_B = 800\,^{\circ}\text{C}; \alpha_{K.B} = 186,768 \text{ Вт/м}^2; t_H = 200\,^{\circ}\text{C}; \alpha_{K.H} = 60,448 \text{ Вт/м}^2$$

получено поле температуры металла, показанное на рис. 3.51, которое почти совпало с распределением на рис. 3.50. Тепловые потоки в обоих случаях были одинаковы.

Следовательно, приведенная выше инструкция позволяет получить решение задачи радиационного нагрева тел.

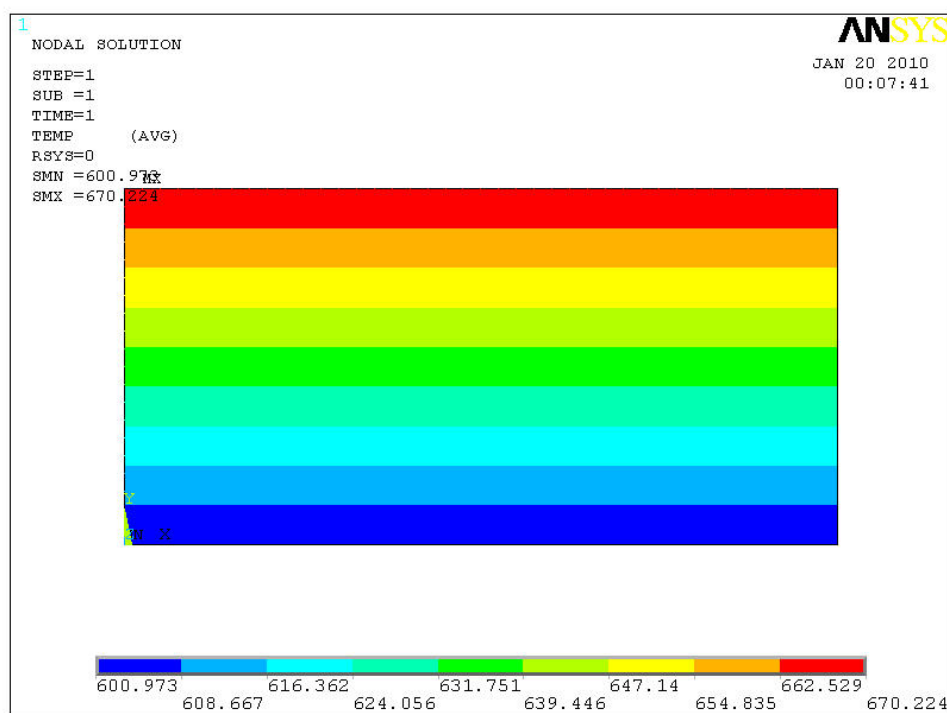


Рис. 3.51. Поле температуры в задаче с эквивалентной конвекцией

3.10. Задачи гидроаэродинамики. Пакет ANSYS/FLOTTRAN

3.10.1. Движение газов в двумерной зоне нагревательной печи

Постановка задачи

Схема зоны с размерами показана на рис. 3.52. На схеме справа вверху расположены горелки (в двумерном изображении получается «горелочная щель»). Через горелки подаются продукты горения со скоростью $V_{Г2} = 1,5$ м/с. В правую нижнюю область зоны через межзонный пережим свода поступают продукты горения из других зон печи со скоростью $V_{Г1} = 0,5$ м/с. Слева продукты горения удаляются из зоны.

Определить поля скоростей дымовых газов, выполнить визуализацию движения газов в камере. Задачу решить во FLOTTRAN ANSYS.

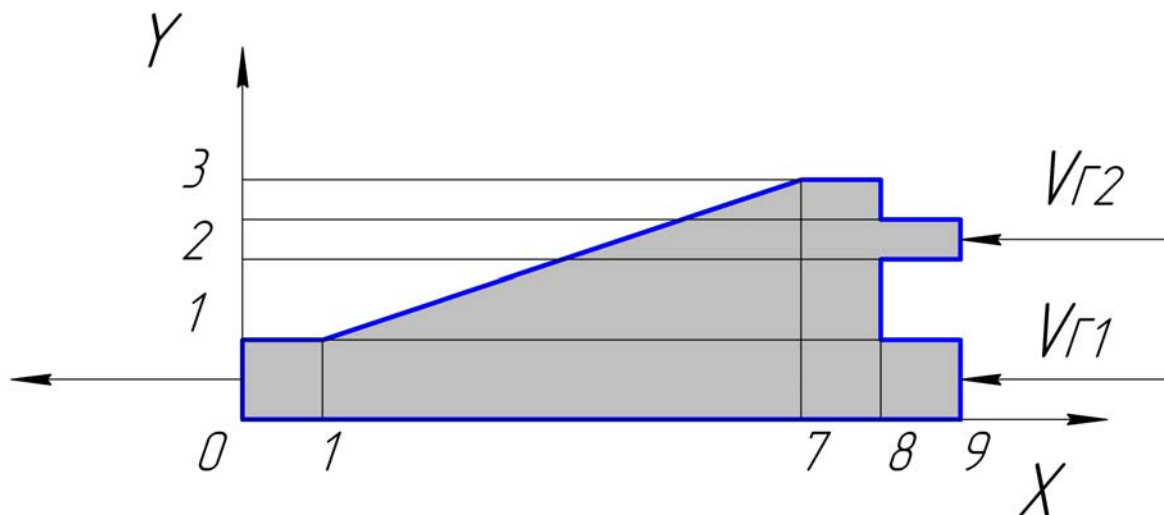


Рис.3.52. Расчетная схема зоны печи

Порядок решения

1. Создание модели объекта.

Боковая поверхность объекта создается с использованием WorkPlane – рабочей плоскости **UTILITY MENU**→**WorkPlane**→**WP Setting**

Появится меню. Выбрать: – **Cartesian**; – **Grid Only**; – **Enable Snap**; «Snap Incr» – **0.5**; «Spacing» – **0.5**; «Minimum» – **0**; «Maximum» – **10**; «Tolerance» – **0.001** → **OK**.

UTILITY MENU → **WorkPlane** → **Display Working Plane**

Перемещая сетку кнопками справа от графического окна и меняя размер, поместить сетку посередине экрана.

Задать ключевые точки (пересечения прямых линий)

MAIN MENU → **PREPROCESSOR** → **MODELING** → **CREATE** → **Keypoints** → **On Working Plane**

Задать ключевые точки, выбирая мышью узлы сетки → **OK**

Создать поверхность с помощью ключевых точек

MAIN MENU → **PREPROCESSOR** → **MODELING** → **CREATE** → **AREAS** → **ARBITRARY** → **Through KPs** →

Появится меню «Create Area thru KPs». Мышью по очереди указать точки или ввести их номера в меню. По завершении → **OK**. Точки указывать строго по порядку по часовой (или против) стрелки.

Появится изображение боковой поверхности объекта (рис. 3.53).

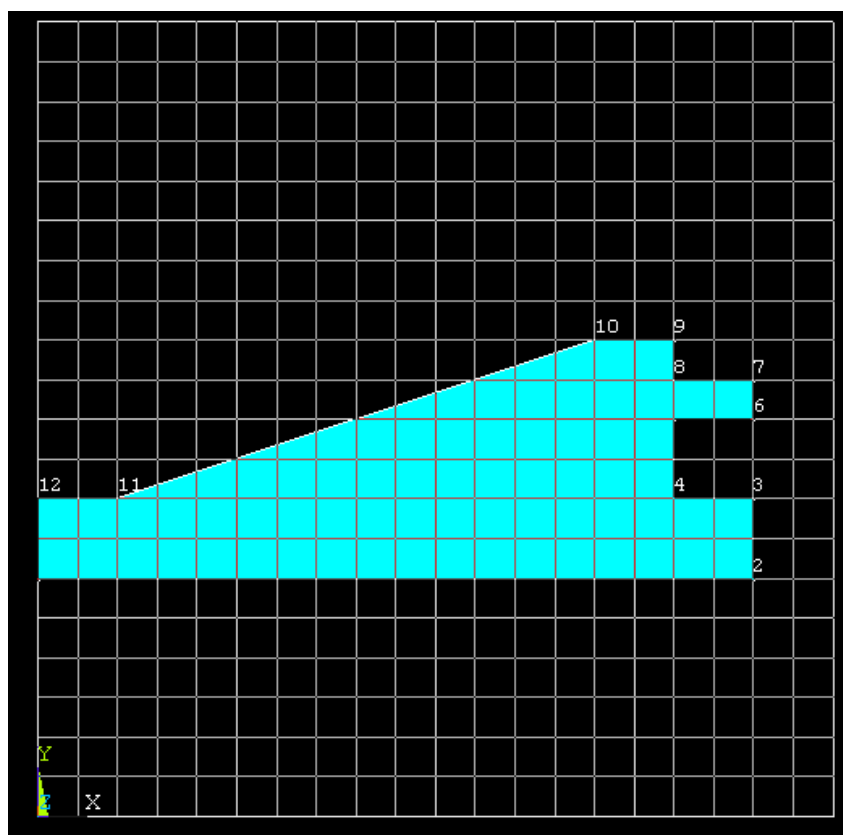


Рис. 3.53. Изображение модели объекта

Сетку на рис. 3.53 можно убрать.

UTILITY MENU→**WorkPlane**→**Display Working Plane** (убрать задание сетки).

2. Выбор типа конечного элемента.

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**ELEMENT TYPE**→**Add/Edit/Delete**→ **Add...**→В меню выбрать слева **FLOTRAN CFD**, справа **2D FLOTRAN 141** → **OK** →**CLOSE**

3. Задание свойств среды.

Цель данного расчета – знакомство с пакетом FLOTRAN, поэтому постановка задачи упрощена. В частности, считается, что свойства дымовых газов совпадают со свойствами воздуха.

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**FLOTRAN Set Up**→**Fluid Properties**→ В меню «Fluid Properties» задать: «Density» – **AIR – SI**; «Viscosity» – **AIR – SI**; «Conductivity» – **Constant**; «Specific heat» – **Constant**; →**OK**. В меню «CFD Flow Properties» задать: «Conductivity» - **-1**; «Specific heat» - **-1**; →**OK**.

4. Построение конечно – элементной модели.

Определение среднего размера граней конечных элементов

MAIN MENU →**PREPROCESSOR**→ **MESHING**→**SIZE CNTRL**→**MANUAL SIZE**→**GLOBAL**→**SIZE**→Задать **SIZE** равным **0.1** →**OK**

Наложение сетки

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→ **MESHING**→**MESH**→**AREAS**→ **FREE**→ **PICK ALL**

В графическом окне появится изображение зоны печи с конечно-элементной сеткой (рис. 3.54).

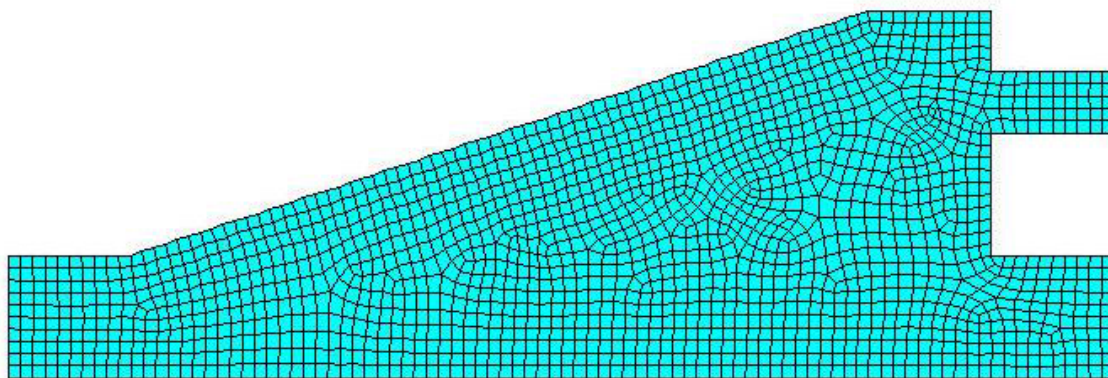


Рис. 3.54. Сеточная модель зоны

5. Сохранение промежуточных результатов работы

UTILITY MENU→FILE→Save as Jobname

6. Задание граничных условий.

Задать скорость дыма, втекающего в камеру через верхнее правое отверстие («горелочную щель»), $V_{Г2} = 1,5$ м/с.

MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS→APPLY→Fluid/CFD→Velocity→On Lines

Выбрать правый край «горелочной щели» (правую часть рисунка можно предварительно увеличить). Появится вертикальная штриховая линия →**OK**. В меню «Apply VELO load on lines» ввести $VX = -1.5$; $VY = 0$; $VZ = 0$. Минус здесь означает, что дым движется противоположно направлению оси X. Убедитесь, что в строке «Apply to endpoint» установлено **Yes** →**OK**.

Задать скорость дыма в нижнем правом вводе газа $V_{Г1} = 0,5$ м/с.

MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS→APPLY→Fluid/CFD→Velocity→On Lines

Выбрать правый край канала под пережимом свода печи – штриховая вертикальная линия – →**OK**. Меню «Apply VELO load on lines» заполнить аналогично предыдущей позиции, но $VX = -0.5$ →**OK**.

На обоих участках подвода газа появились стрелки, указывающие, что данные граничные условия заданы.

Задать нулевую скорость газа на всех «газонепроницаемых» поверхностях, ограничивающих зону печи, **MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS→APPLY→Fluid/CFD→Velocity→On Lines**

Выбрать все непроницаемые поверхности →**OK**. Задать $VX = VY = VZ = 0$;

«Apply to endpoint» установить **Yes** →**OK**.

Обозначить открытый торец камеры слева

MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS→APPLY→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Lines

Выбрать левую грань, через которую дымовые газы удаляются, – штриховая вертикальная линия – →**OK**. В меню «Apply PRES on lines» задать «Pressure value» – **0**; – **Yes** →**OK**. Таким образом, на выходе из печи задали атмосферное давление. Полученное изображение камеры в графическом окне показано на рис. 3.55.

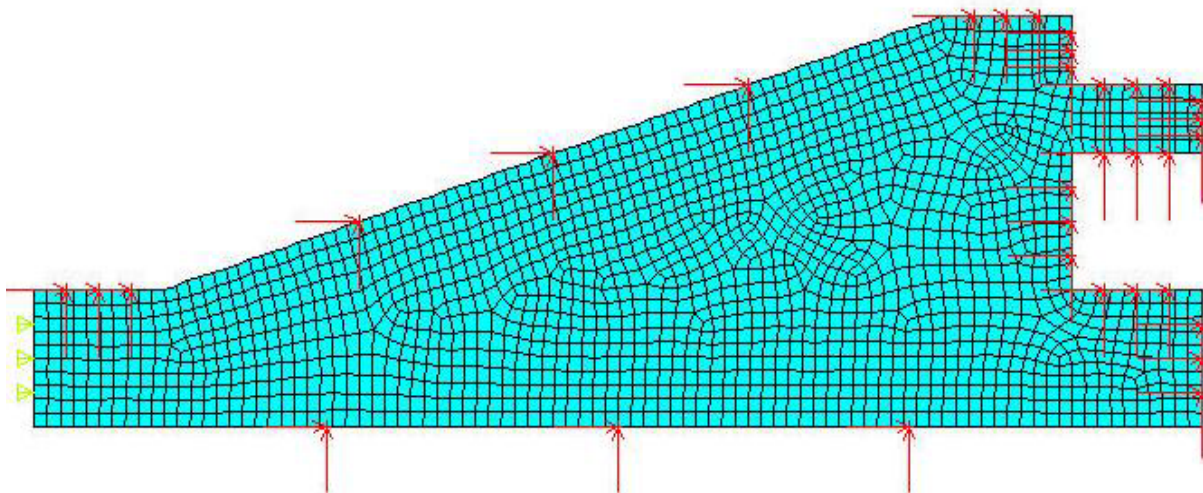


Рис. 3.55. Изображение зоны после задания граничных условий

7. Подготовка решения.

MAIN MENU→SOLUTION→FLOTRAN Set Up→Execution Ctrl

В поле «Global iteration» ввести **200** (остальные величины не изменяются) →**OK**.

8. Решение.

MAIN MENU→SOLUTION→Run FLOTRAN

9. Представление результатов решения задачи.

○ **MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ Read RESULTS→Last Set**

Считываются из файла результатов и размещаются в памяти «результаты, соответствующие последнему шагу». Такое действие необходимо, «когда набор результатов не единственный (например, есть история нелинейного процесса)» [7].

Построение изолиний полной скорости газов.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ PLOT RESULTS→CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU

В появившемся меню выбрать →**Nodal Solution→Fluid velocity→OK**. Результат представлен на рис. 3.56. Здесь показаны суммарные скорости потока газа, м/с. Из рисунка видно, что локальные значения скорости могут быть больше средней скорости на входе газа в горелку (до 1,851 м/с).

Построение поля векторов скорости газов.

MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ VECTOR PLOT →Predefined

В появившемся меню выбрать: **DOF solution**→**Velocity V**→**OK**.
Результат представлен на рис. 3.57.

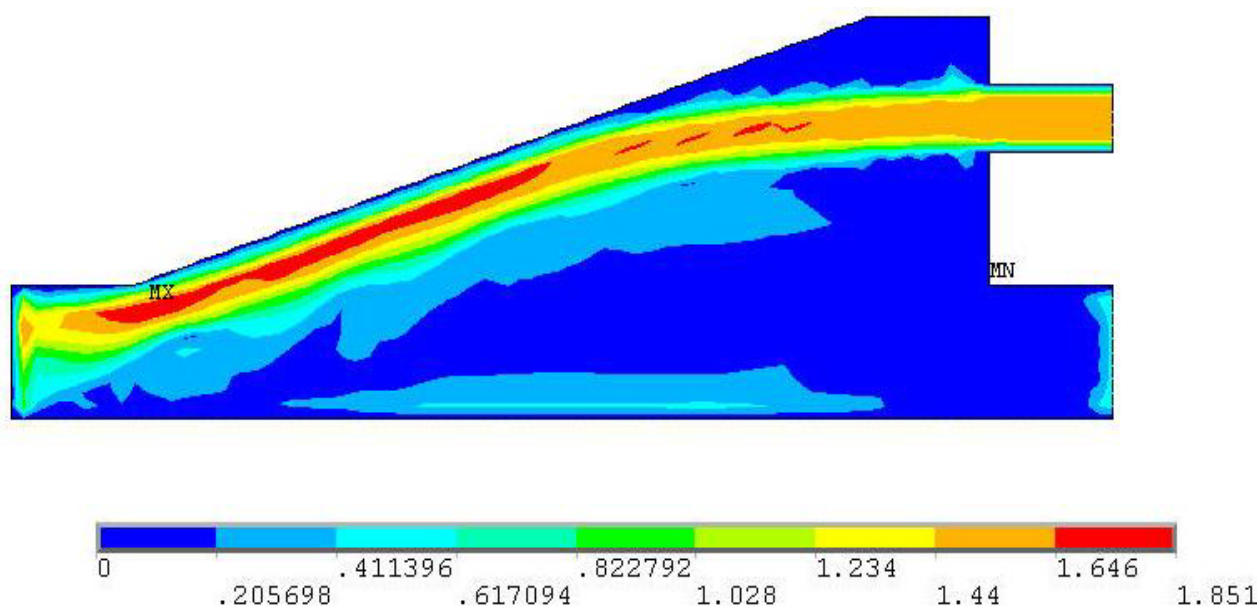


Рис. 3.56. Распределение суммарной скорости потока газа

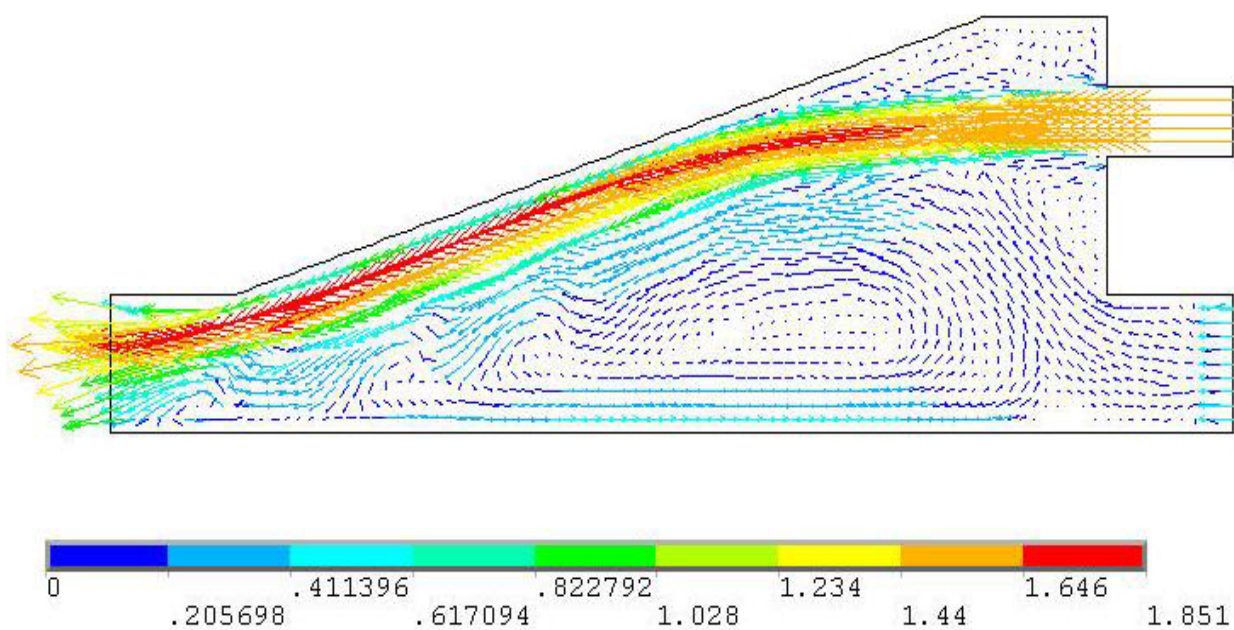


Рис. 3.57. Поле векторов скорости газов

3.10.2. Движение газов в зоне печи. Влияние физических свойств

Постановка задачи

Повторно решается задача параграфа 3.10.1 с измененными физическими свойствами движущейся среды. Задаются реальные свойства дымовых газов среднего состава (в параграфе 3.10.1 задавались свойства воздуха, определенные программой ANSYS автоматически).

Порядок решения

Выполнить действия, описанные в пунктах 1–2 параграфа 3.10.1.

3. Задание свойств среды.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → FLOTTRAN Set Up → Fluid Properties → В меню «Fluid Properties» убедиться, что во всех полях указано **Constant** (если свойства при решении задачи задаются постоянными. Для задания переменных свойств предусмотрен табличный ввод данных, определение их пользователем и др.) → **OK**.

В следующем меню «CFD Flow Properties» задать параметры дымовых газов в зоне печи, соответствующие температуре 300 °С. В верхнее окно вкладки для плотности «Density» ввести значение «Constant value» **0.617**; в окно коэффициента динамической вязкости «Viscosity» ввести **2.82e-005**; в окно теплопроводности «Conductivity» ввести **0.0484**; в окно теплоемкости «Specific heat» ввести **1122**; → **OK**. Введенные данные соответствуют свойствам: $\rho = 0,617 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 0,000\,028\,2 \text{ Н}\cdot\text{с/м}^2 \text{ (Па}\cdot\text{с)}$; $\lambda = 0,0484 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$; $c = 1122 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}$.

Выполнить действия, описанные в пунктах 4–9 параграфа 3.10.1.

В результате решения задачи получены: распределение изолиний скорости дымовых газов (см. рис. 3.58), поле векторов скорости газов (см. рис. 3.59) и распределение давлений (см. рис. 3.60).

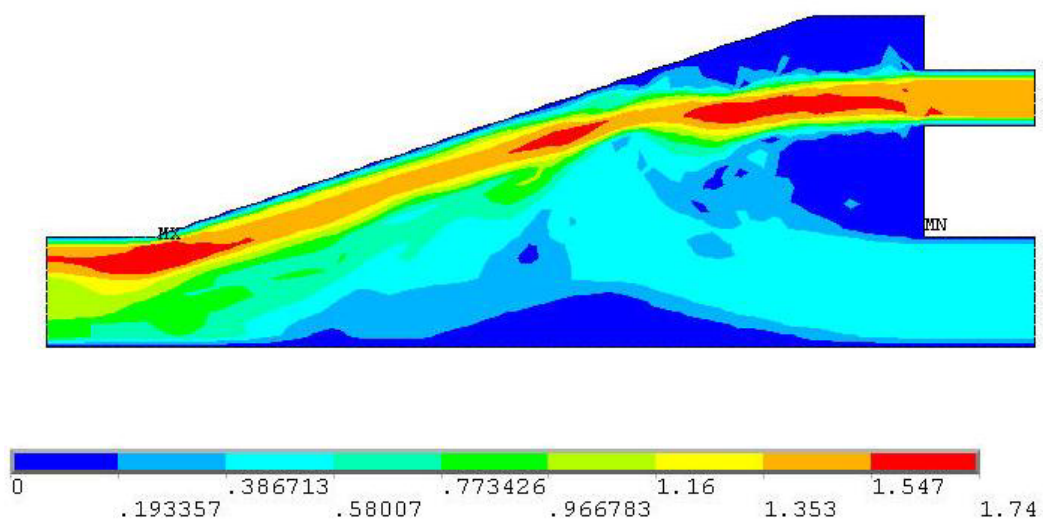


Рис. 3.58. Распределение скорости газов в зоне печи

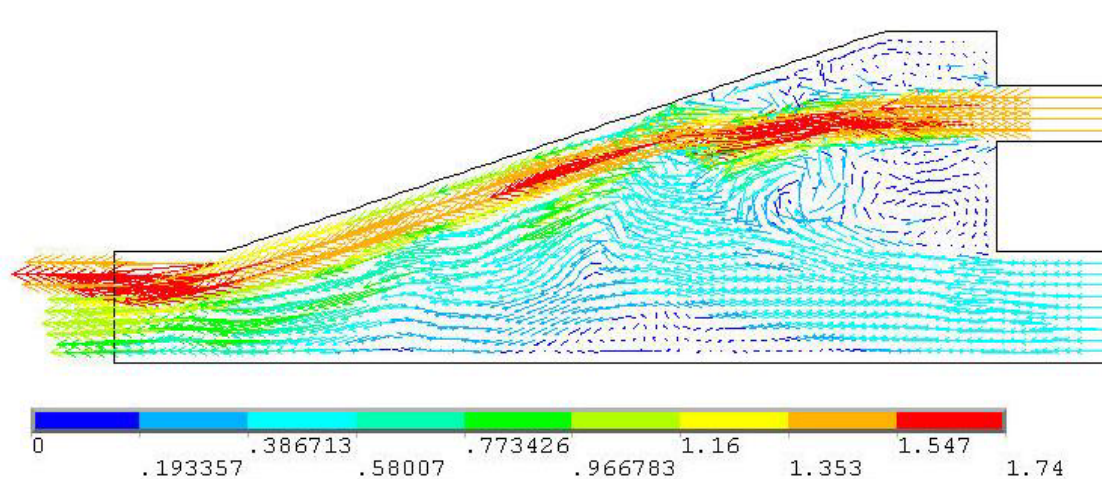


Рис. 3.59. Распределение векторов скорости газов в зоне

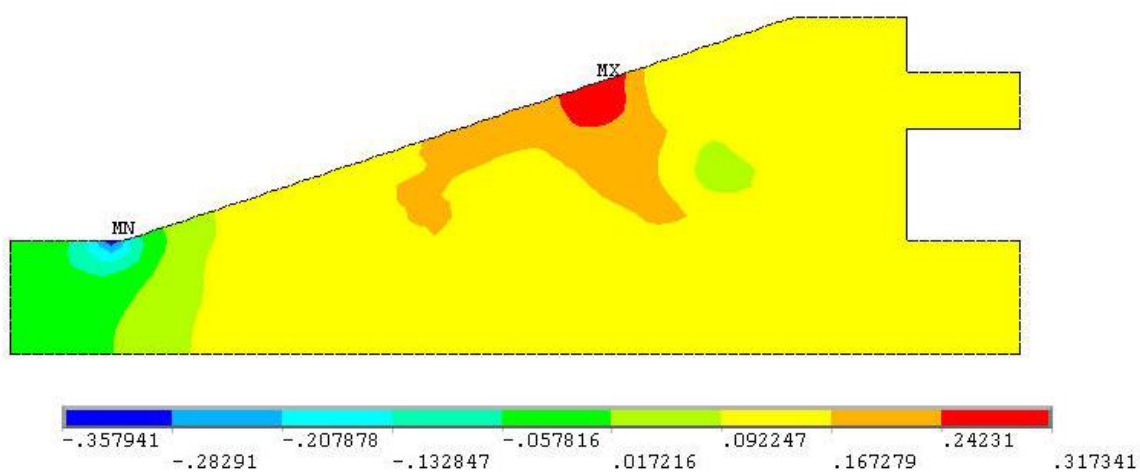


Рис. 3.60. Распределение давлений в зоне

3.10.3. Охлаждение потока дымовых газов в канале

Постановка задачи

Дымовые газы с температурой 400°C движутся после рекуператора в водоохлаждаемом щелевом канале высотой 0,2 м и длиной 6,0 м. На входе в канал скорость газа равномерная, равная 0,5 м/с. Режим движения газов турбулентный ($Re > 4300$).

Найти распределение скоростей и температуры дыма в канале. В расчетах использовать стандартную К-ε модель турбулентности. Расчет выполнить в двух вариантах: 1) считать температуру стенок канала равной 50°C ; 2) считать, что на границах канала расположены стенки, передающие тепло к окружающей среде. Коэффициент теплопередачи через стенки, аналогичный коэффициенту теплоотдачи конвекцией, равен $21,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; температура окружающей среды 25°C .

Порядок решения

Первый вариант расчета

1. Создание модели объекта.

Построить прямоугольник со сторонами 6,0 и 0,2 метра по осям **OX** и **OY**

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**MODELING**→**CREATE**→**AREAS**→**RECTANGLE**→**BY 2 CORNERS**→**X=0, Y=0, Width=6, Height=0.2**→**OK**.

2. Выбор типа конечного элемента.

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**ELEMENT TYPE**→**Add/Edit/Delete**→**Add...**→В левой части меню выбрать **FLOTRAN CFD**, в правой части – **2D FLOTRAN 141**→**OK**→**CLOSE**

3. Задание свойств среды.

MAIN MENU→**PREPROCESSOR**→**FLOTRAN Set Up**→**Fluid Properties**→ В меню «Fluid Properties» убедиться, что во всех полях указано **Constant** (если свойства при решении задачи задаются постоянными. Для задания переменных свойств предусмотрен табличный ввод данных, определение их пользователем и др.)→**OK**.

В следующем меню «CFD Flow Properties» задать свойства дыма среднего состава, такие же, как в параграфе 3.10.2: «Density» – **0.617**; «Viscosity» – **2.82e-005**; «Conductivity» – **0.0484**; «Specific heat» – **1122**; →**OK**.

4. Построение конечно-элементной модели.

Разбить верхнюю и нижнюю линии на 100 частей.

Определение среднего размера граней конечных элементов.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → SIZE CNTRLS → MANUAL SIZE → LINES → Picked Lines

Выбрать левую и правую поверхности →**OK**. В меню ввести «No. of element divisions» – **50**.

Наложить сетку.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → MESH Attributes → Default Attribs

В меню «Meshing Attributes» должно быть задано: «TYPE» – **1FLUID141**; «MAT» – **None defined** или **1**; «REAL» – **None defined**; «ESYS» – **0**; «SECNUM» – **None defined** →**OK**.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → MESHING → MESH → Areas → Free

Выделить объект →**OK**. При увеличении изображения объекта в графическом окне становится видимой сетка. Объект при малом разрешении показан на рис. 3.61. Левая часть увеличенного изображения канала с сеткой показана на рис. 3.62.

5. Сохранение промежуточных результатов работы.

UTILITY MENU → FILE → Save as Jobname

6. Задание граничных условий.

Задать скорость дыма, втекающего в камеру, равной 0,5 м/с.

MAIN MENU → PREPROCESSOR → LOADS → DEFINE LOADS → APPLY → Fluid/CFD → Velocity → On Lines

Выбрать левый край канала →**OK**. В меню «Apply VELO load on lines» ввести **VX – 0.5**; **VY – 0**; **VZ – 0**; – **Yes** ; – **Constant value** →**OK**.

Задать нулевую скорость газа на «газонепроницаемых» поверхностях **MAIN MENU → PREPROCESSOR → LOADS**

→ DEFINE LOADS → APPLY → Fluid/CFD → Velocity → On Lines

Выбрать верхнюю и нижнюю поверхности →**OK**. Задать **VX = VY = VZ = 0**; «Apply to endpoint» установить **Yes** →**OK**.



Рис. 3.61. Изображение сетки при малом разрешении

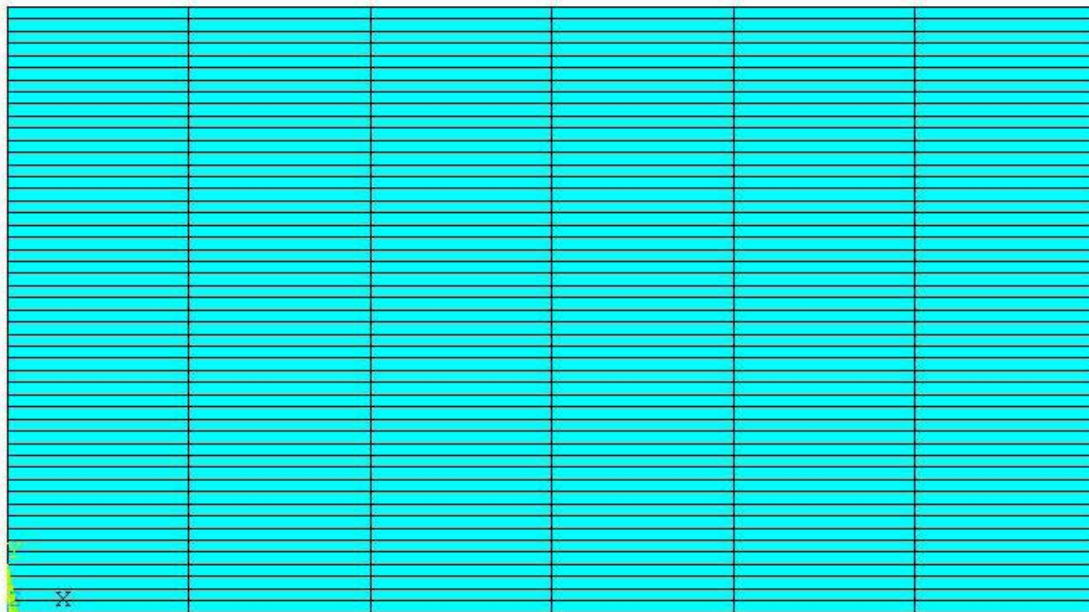


Рис. 3.62. Сетка при увеличенном изображении канала

Обозначить открытый торец канала

**MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS
→APPLY→Fluid/CFD→Pressure DOF→On Lines**

Выделить правую поверхность канала – →**OK**. В меню «PRES» –
0; – «Yes» →OK.

7. Задание тепловых граничных условий.

Задать температуру дыма на входе в канал 400 °C.

**MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS
→APPLY→Thermal→Temperature→On Lines**

Выбрать левую поверхность канала →**OK**. В меню выбрать: –
TEMP; – Constant value; 400; →OK.

Задать температуру верхней и нижней поверхностей 50 °C

**MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS
→APPLY→Thermal→Temperature→On Lines**

Выбрать правую и нижнюю поверхности канала →**OK**. В меню выбрать: – **TEMP**; – **Constant value**; **50**; →**OK**.

8. Подготовка решения задачи.

MAIN MENU→**SOLUTION**→**FLOTRAN Set Up**→**Execution Ctrl**

В поле «Global iteration» ввести **250** (остальные величины не изменяются) →**OK**.

MAIN MENU→**SOLUTION**→**FLOTRAN Set Up**→**Turbulence**→**Turbulence Model**

Убедиться, что задана модель турбулентности «Стандартная К-ε » (указатель должен быть в поле «Standard K-E») →**OK**.

MAIN MENU→**SOLUTION**→**FLOTRAN Set Up**→**Execution Ctrl**

Задать: «TRAN...» – **Steady State**; «FLOW...» – **Yes**; «TEMP...» – **Thermal**; «TURB...» – **Turbulent**; «COMP...» – **Incompressible**; далее везде – **No** →**OK**.

9. Запуск процесса решения.

MAIN MENU→**SOLUTION**→**Run FLOTRAN**

После сообщения «Solution is done!» – **Close**. На рис. 3.63 показана завершающая часть изображения на экране, информирующего о ходе вычислительного процесса.

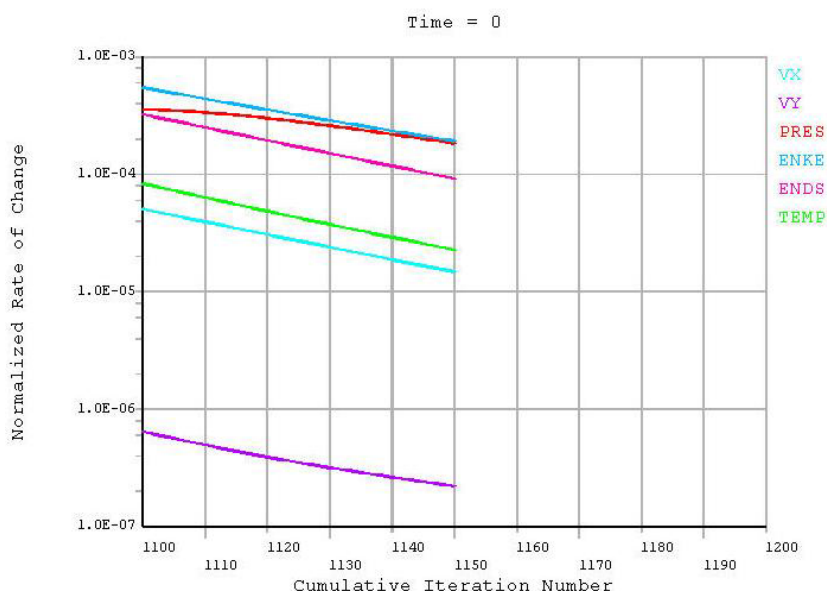


Рис. 3.63. Информация о ходе вычислительного процесса

10. Представление результатов решения задачи.

MAIN MENU→**GENERAL POSTPROC**→**Read RESULTS**

→**Last Set** Считываются данные из файла результатов.

Построение изолиний полной скорости газов.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ PLOT RESULTS
→CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU**

В меню →**Nodal Solution→Fluid velocity→OK.**

Результаты расчета для входной части канала представлены на рис. 3.64. Из рисунка видно, как стержневой поток со средней скоростью 0,5 м/с постепенно деформируется, в нем появляется центральная область повышенной скорости, формируется постоянное распределение скорости по сечению канала.

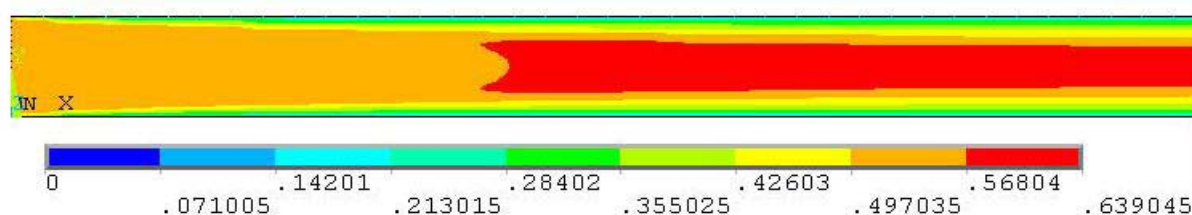


Рис. 3.64. Изолинии скорости газов в канале

Поле векторов скорости газов.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→ VECTOR PLOT
→Predefined**

В меню: **DOF solution→Velocity V→OK.** Рис. 3.65 показывает процесс формирования распределения скорости при движении газов во входной части канала, а рис. 3.66 – в выходной части канала.

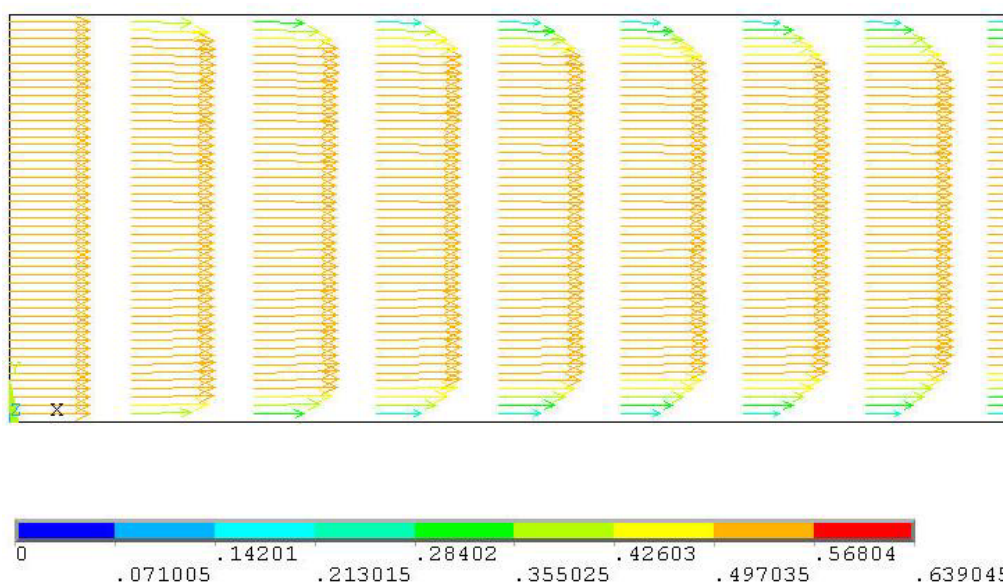


Рис. 3.65. Распределение скорости во входной части канала

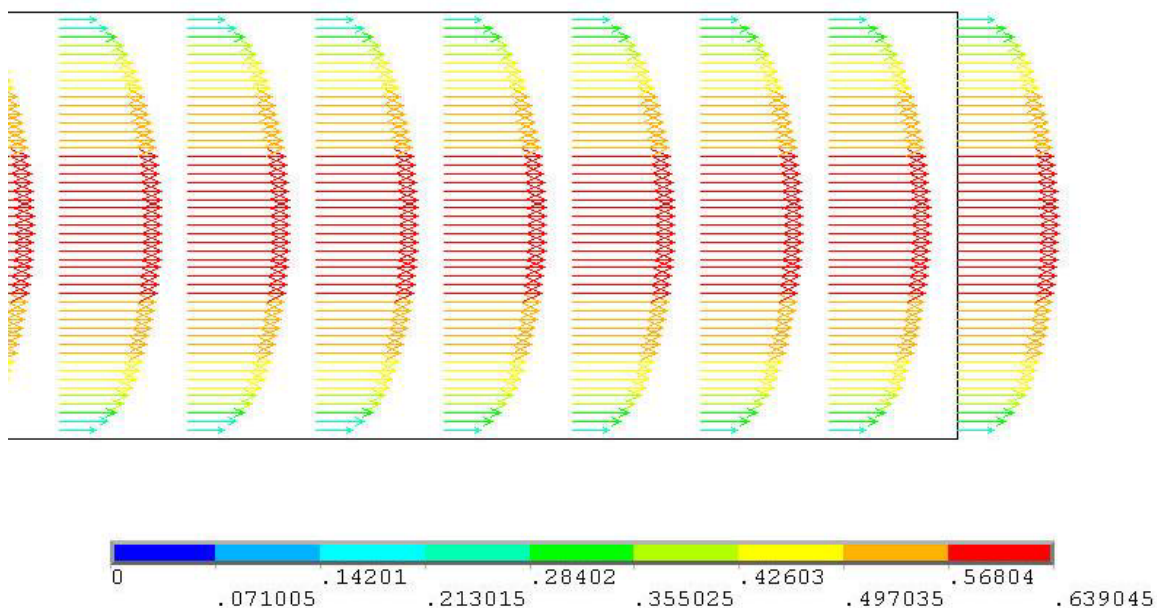


Рис. 3.66. Распределение скорости в выходной части канала

Поле температуры.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS
→CONTOUR PLOT→NODAL SOLU→DOF SOLUTION→Nodal
Temperature →OK**

На рис. 3.67 показано изменение поля температуры во входной части канала, на рис. 3.68 – в выходной его части.

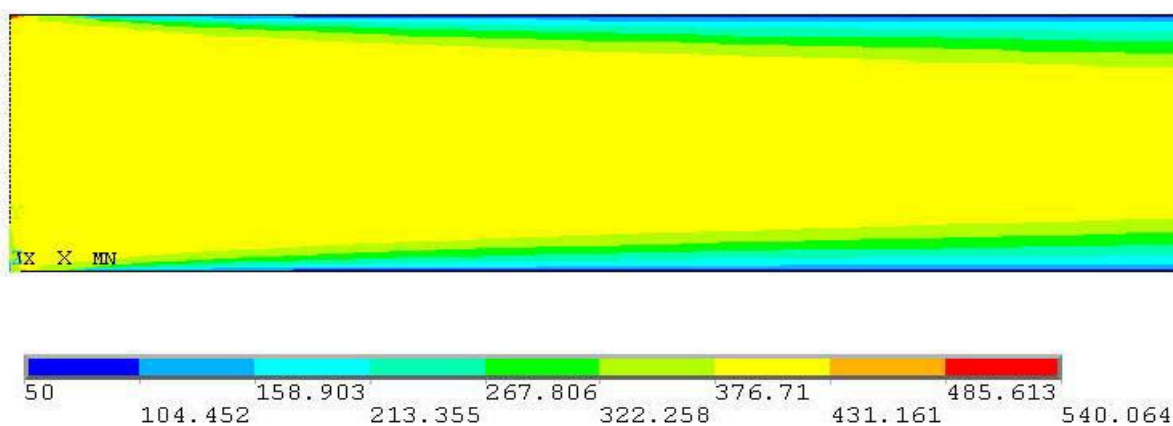


Рис. 3.67. Поле температуры во входной части канала

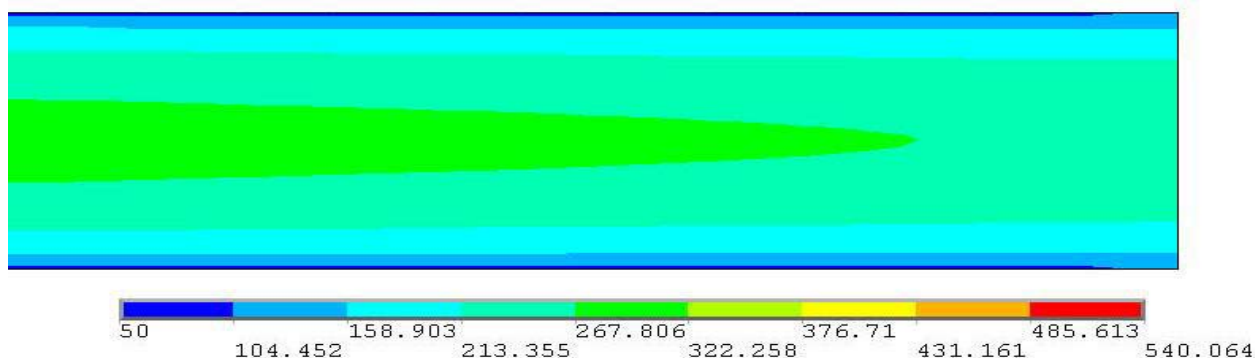


Рис. 3.68. Поле температуры в выходной части канала

Второй вариант расчета

Постановка задачи соответствует постановке задачи в первом варианте расчета. Граничные условия на верхней и нижней стенках канала изменены. Считается, что на границах канала расположены стенки, передающие тепло к окружающей среде.

11. **Выполнить действия, описанные выше в пунктах 1–6.**

12. Задание тепловых граничных условий.

Задать температуру дыма на входе в канал 400°C

**MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS
→APPLY→Thermal→Temperature→On Lines**

Выбрать левую поверхность канала →OK. В меню выбрать: **TEMP; Constant value; 400; →OK.**

Задать условия теплопередачи на верхней и нижней поверхностях

**MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS
→APPLY→Thermal→Convection→On Lines**

Выбрать правую и нижнюю поверхности канала →OK. В меню «Apply CONV on lines» ввести: «Film coefficient» – **21; Constant value;** «Bulk temperature» – **25; →OK.**

13. **Выполнить действия, описанные выше в пунктах 8–10.**

Результаты расчетов представлены графически: рис. 3.69 показывает поле температуры на выходе из канала; рис. 3.70 – поле температуры на входе в канал, рис. 3.71 – поле давлений в канале.

Сравнение результатов первого и второго вариантов расчета показывает, что в качественном отношении они аналогичны.

Количественные расхождения можно оценить по данным рисунков.



Рис. 3.69. Распределение температуры на выходе из канала

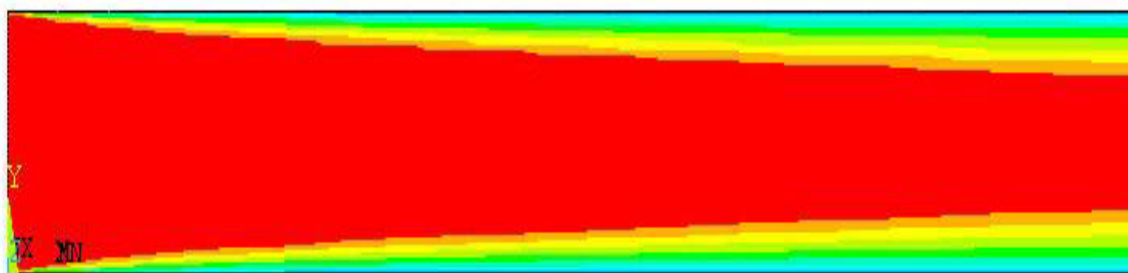


Рис. 3.70. Распределение температуры на входе в канал



Рис. 3.71. Распределение давлений в канале

3.10.4. Теплообмен и движение газов в нагревательной печи

Постановка задачи

Решается задача расчета процессов в зоне нагревательной печи, частично описанная в параграфе 3.10.1. В постановку задачи добавлен расчет процесса теплообмена. При этом иначе задаются свойства потока дымовых газов (свойства взяты из задачи параграфа 3.10.3). Добавлены тепловые граничные условия на поверхностях, ограничивающих рабочее пространство. Температура газов на входе в горелки задана равной 400°C . Температура газов на входе в зону из пережима свода равна 300°C , температура поверхности пода печи, имитирующей поверхность нагреваемого металла, равна 100°C . Теплопередача стенок, ограничивающих зону сверху, определяется так же, как в параграфе 3.10.3: коэффициент теплопередачи равен $21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$, температура окружающей печь среды 25°C .

Порядок решения

Выполнить действия, описанные в пунктах 1–2 параграфа 3.10.1.

3. Задание свойств среды.

MAIN MENU→PREPROCESSOR→FLOTTRAN Set Up→Fluid Properties→ В меню «Fluid Properties» убедиться, что во всех полях указано **Constant** (если свойства при решении задачи задаются постоянными. Для задания переменных свойств предусмотрен табличный ввод данных, определение их пользователем и др.) →**OK**.

В следующем меню «CFD Flow Properties» задать свойства дыма среднего состава такие же, как в параграфе 5.7.2: «Density» – **0.617**; «Viscosity» – **2.82e-005**; «Conductivity» – **0.0484**; «Specific heat» – **1122**; →**OK**.

Выполнить действия, описанные в пунктах 4-6 параграфа 3.10.1.

7. Задание тепловых граничных условий.

Задать температуру дыма на входе в «горелочную щель» – 400°C .

**MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS
→APPLY →Thermal →Temperature→ On Lines**

Выбрать правый край «горелочной щели», появится вертикальная штриховая линия →**OK**. В меню выбрать: **TEMP; Constant value;** задать «Temp value» – **400**; «Apply TEMP to endpoints» – **Yes** →**OK**.

В месте ввода граничного условия в графическом окне появится треугольник.

На входе в пережим свода задать температуру 300 °С.

На нижней поверхности камеры задать «среднюю температуру» пода 100 °С.

На верхних огнеупорных поверхностях кладки задается условие теплопередачи

**MAIN MENU→PREPROCESSOR→LOADS→DEFINE LOADS
→APPLY →Thermal →Convection→ On Lines**

Выбрать верхние поверхности канала →**OK**. В меню «Apply CONV on lines» ввести: «Film coefficient» – **21**; **Constant value;** «Bulk temperature» – **25**; →**OK**.

Изображение на графическом экране показано на рис. 3.72.

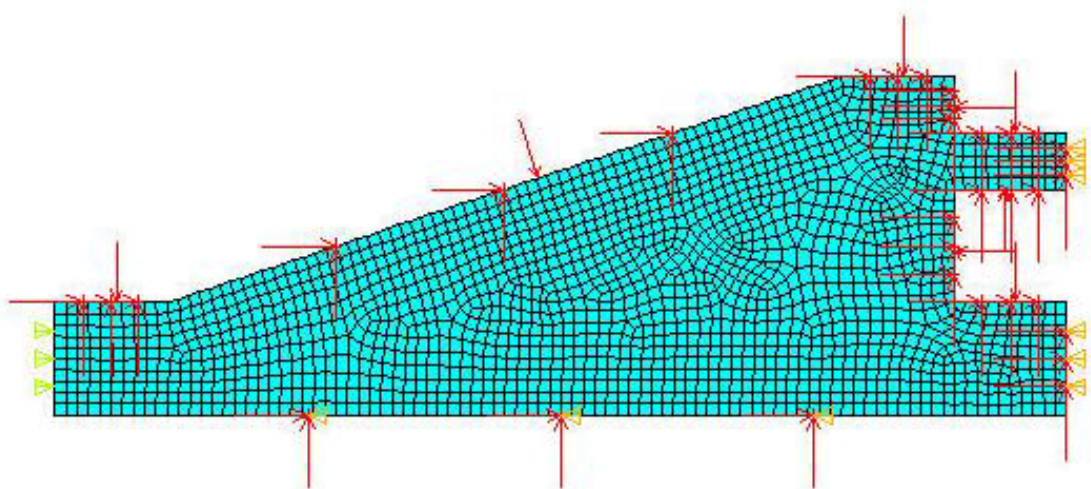


Рис. 3.72. Схема зоны печи после задания граничных условий

8. Подготовка решения.

MAIN MENU→SOLUTION→FLOTTRAN Set Up→Execution Ctrl

В поле «Global iteration» ввести **200** (остальные величины не изменяются) →**OK**.

MAIN MENU→SOLUTION→FLOTTRAN Set Up→Execution Ctrl

Задать: «TRAN...» – **Steady State**; «FLOW...» – **Yes**; «TEMP...» – **Thermal**; «TURB...» – **Laminar**; «COMP...» – **Incompressible**; в остальных окнах указать – **No** →**OK**.

9. Запустить решение

MAIN MENU→**SOLUTION**→**Run FLOTRAN**

Решение задачи остановится, появится сообщение об ошибке:

«Coefficient matrix has a negative diagonal. Probably indicates divergent solution...» и кнопка **«Proceed»**.

(При повторных запусках решения задачи сообщение об ошибке может не появляться.)

Примечание. Возникшую проблему поясняет **CFD Tutorial** программы ANSYS, в параграфе «5.1. Laminar and TURBULENT Flow Analyses in a 2-D Duct» которого сообщается: «ANSYS выдает это сообщение потому, что использует по умолчанию схему адвекции «Линия обтекания против ветра» Петрова–Галеркина (SUPG). Хотя схема точнее других, но может приводить к случайным колебаниям решения, нефизичным решениям или проблемам сходимости. В этой ситуации, чтобы обойтись без перехода к другим схемам адвекции, сначала можно применить средство – добавить некоторое смягчение инерции релаксации (ослабления) и произвести решение снова». (Перевод автора приблизительный.)

→**Proceed** → **Close**.

10. Выполнить команды

MAIN MENU→**SOLUTION**→**FLOTRAN Set Up**→**Relax/Stab/Cap**
→**MIR Stabilization**

В окно «Momentum Equation» ввести **0.2**; в окно «Energy Equation» ввести **0.2** →**OK**.

11. Снова запустить решение задачи

MAIN MENU→**SOLUTION**→**Run FLOTRAN**

12. Представление результатов решения задачи.

MAIN MENU→**GENERAL POSTPROC**→**Read RESULTS**
→**Last Set**

Считываются данные из файла результатов.

Построение изолиний полной скорости газов.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS
→CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU**

В появившемся меню выбрать **DOF Solution→Fluid velocity→OK**.

Результат представлен на рис. 3.73.

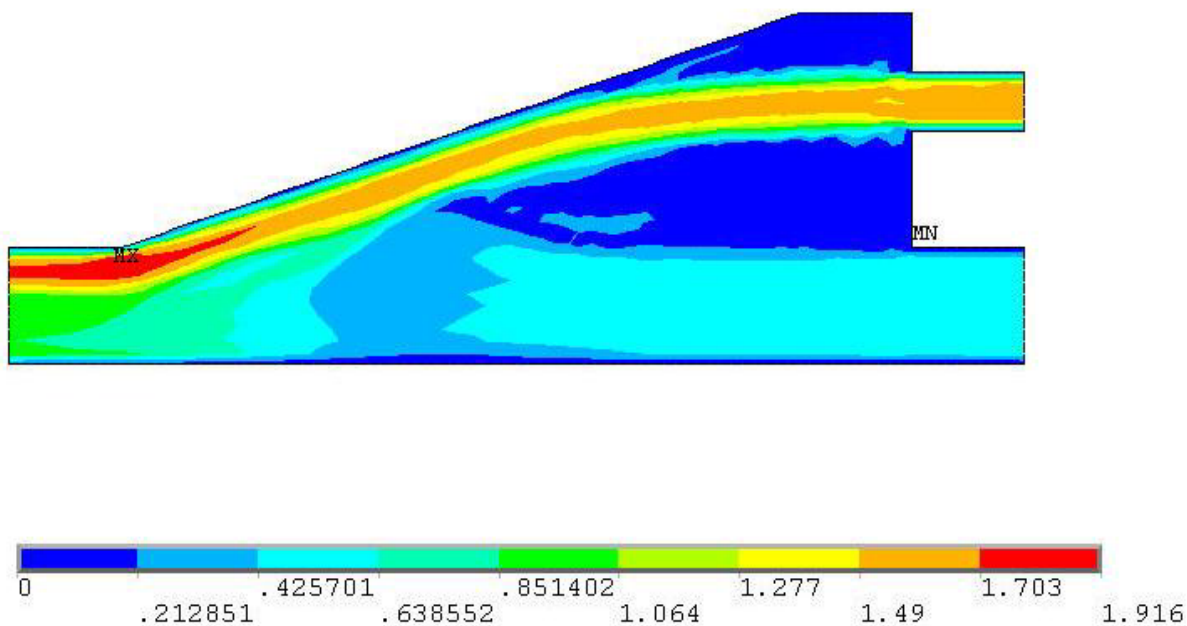


Рис. 3.73. Распределение изолиний скорости газов

Построение поля температуры.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS
→CONTOUR PLOT→ NODAL SOLU→DOF SOLUTION→Nodal
Temperature →OK**

Полученное изображение представлено на рис.3.74.

Построение поля векторов скорости газов.

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→VECTOR PLOT
→Predefined**

В появившемся меню выбрать: **DOF solution→Velocity V→OK**.

Полученное изображение показано на рис. 3.75.

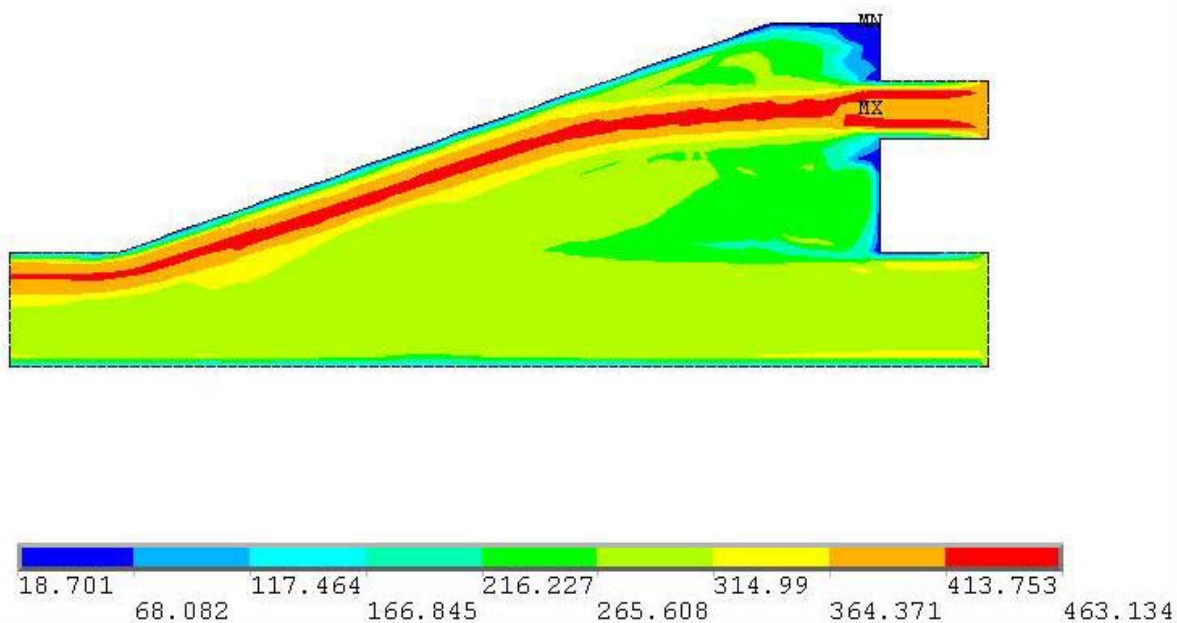


Рис. 3.74. Распределение температуры в зоне печи

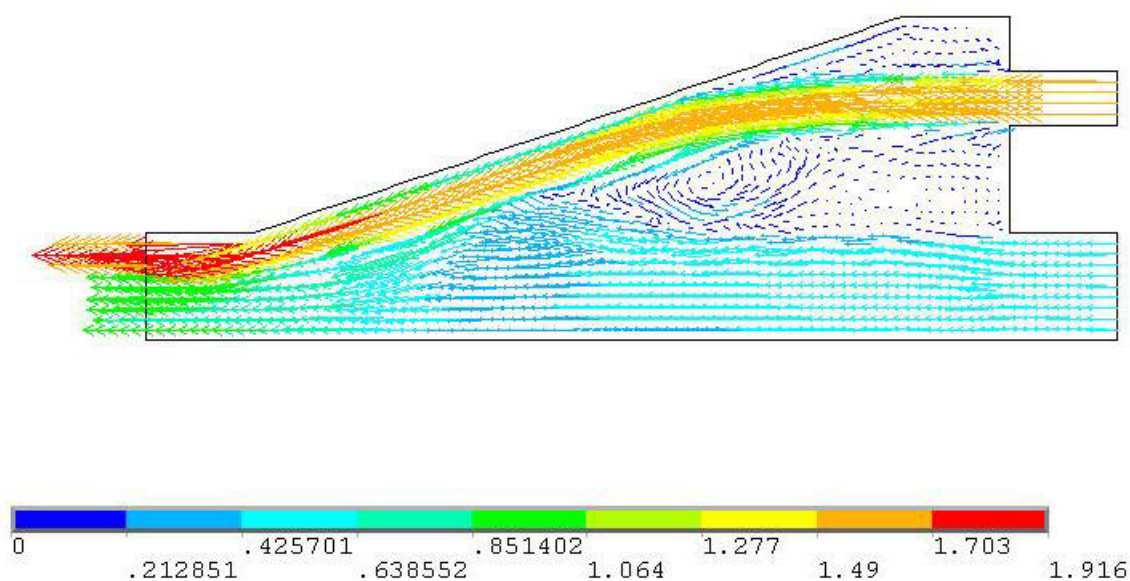


Рис. 3.75. Распределение векторов скорости газов в зоне

Построение распределения полного статического и динамического давления (total pressure).

**MAIN MENU→GENERAL POSTPROC→PLOT RESULTS
→CONTOUR PLOT→NODAL SOLU→Other FLOTRAN
Quantities→Total stagnation pressure →OK**

Полученное распределение давления показано на рис. 3.76.

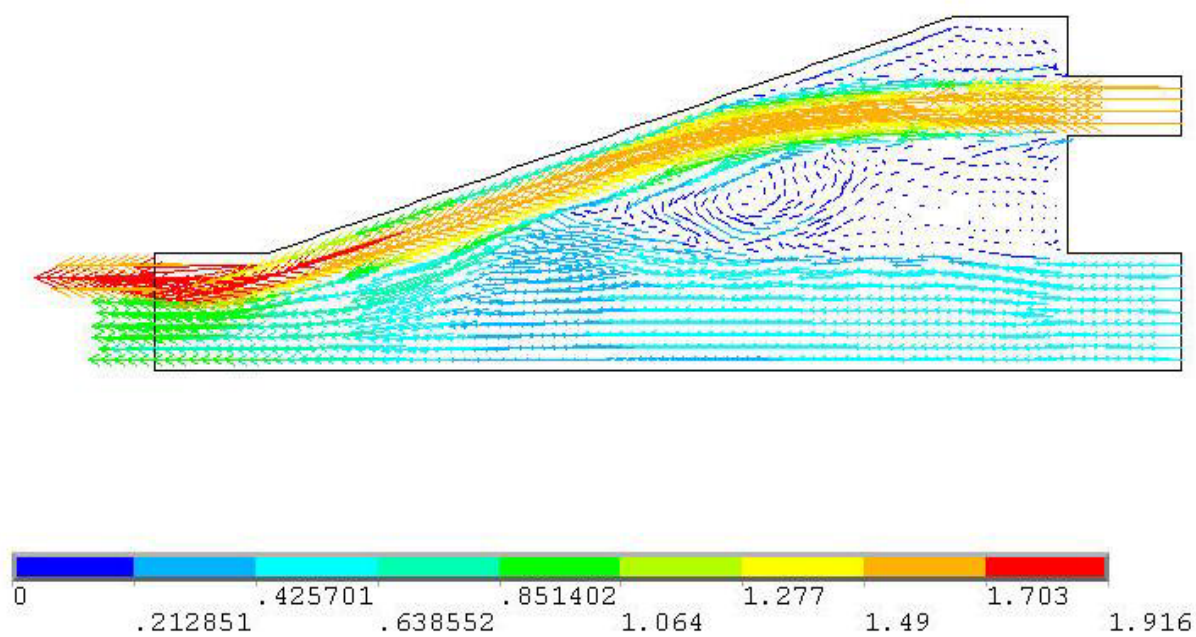


Рис. 3.76. Распределение полного давления в зоне

Глава 4

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ANSYS CFX В CAE–ТЕХНОЛОГИЯХ

4.1. Компьютерные технологии проектирования

В металлургии СССР массовое применение компьютерных исследований началось во второй половине XX века. Во многих отраслевых НИИ разрабатывались методы и расчетные программы моделирования технологических процессов [8,22]⁴. В частности, ряд математических моделей процессов в промышленных печах и тепловых устройствах металлургии разработан во ВНИИМТ. На основании расчетных исследований совершенствовались технологии [23], реконструировались существующие [24] и проектировались новые агрегаты [25].

В 1980-90–х годах началось массовое внедрение проблемно ориентированных программных систем и сред. Компьютерные технологии вычислений начали изменяться качественно, благодаря использованию разрабатываемых наукоемких программных комплексов. Сформировался новый подход к проектированию и производству продукции – **CALS-технологии** (*Continuous Acquisition and Life cycle Support* — непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла). Подход заключается в использовании компьютерной техники и современных информационных технологий на всех стадиях жизни продукции и в обеспечении единообразия по международным стандартам способов управления процессами.

Проектная часть жизненного цикла и CALS-технологий включает:

CAD (*Computer-aided design*) – систему автоматизированного проектирования — программный пакет, предназначенный для создания чертежей, 3D-моделей и документации;
CAE (*Computer-aided engineering*) – систему программных средств для инженерных расчётов, анализа и симуляции физических процессов;

⁴ Работы по данным направлениям имеют обширную библиографию. Здесь ссылки даны в качестве примеров выполнявшихся работ.

CAM (*Computer-aided manufacturing*) – систему компьютерной поддержки изготовления изделий.

Система расчетов и инженерного анализа CAE и система конструкторского проектирования CAD часто используются вместе и образуют гибридные CAD/CAE-системы. В них конструирование включает объемное и плоское геометрическое моделирование, инженерный анализ на расчётных моделях высокого уровня, оценку проектных решений и получение чертежей.

Расчетная часть пакетов позволяет осуществлять симуляцию физических процессов, определять работоспособность изделий, поведение в условиях эксплуатации. Вычислительный процесс основан на численных методах решения дифференциальных уравнений, таких как метод конечных элементов, метод конечных объёмов, метод конечных разностей и др.

CAD–, CAE–, CAM–системы часто условно разделяют на три группы: легкие, средние и тяжелые системы.

Из наиболее распространенных в РФ пакетов к *легким системам* можно отнести **AutoCAD, КОМПАС** и др. Они устанавливаются на индивидуальных персональных компьютерах и предназначены, в первую очередь, для качественного выполнения чертежей. Пакеты просты в использовании, содержат множество библиотек стандартных элементов, поддерживают различные стандарты оформления графической документации.

К *системам среднего класса* относят **Solid Works, Solid Edge** и др. Большинство систем основываются на трёхмерном твёрдотельном моделировании. Они позволяют проектировать большинство деталей, сборочные единицы среднего уровня сложности, выполнять совместную работу группам конструкторов.

Системы тяжёлого класса предоставляют полный набор интегрированных средств проектирования, производства, анализа изделий. К ним относят пакеты **CATIA, Unigraphics, Pro/ENGINEER, CADD5, EUCLID, Cimatron, Ansys, LS-Dyna, Adams, Nastran, ABAQUS**. Системы тяжёлого класса позволяют решать широкий спектр конструкторско-технологических задач. Им доступно много дополнительных функций. Например, может выполняться проектирование массивных сборок, требующих тщательной компоновки и содержащих элементы инфраструктуры (кабельные жгуты, трубопроводы), работа со сложными сборками в

режиме вариантного анализа для быстрого просмотра и оценки качества компоновки изделия.

4.2. Особенности вычислительного процесса в ANSYS CFX⁵

Материалы предыдущих глав показывают большие возможности ANSYS Myltiphusics по инженерному анализу в области САЕ–технологий проектирования. Программный комплекс охватывает широкий круг задач теплофизического моделирования, как тепловых устройств, так и других объектов, в которых тепловые процессы протекают одновременно с другими процессами. Однако любой программный продукт имеет свои недостатки.

Возможности ANSYS Myltiphusics (и большинства прочих пакетов) ограничены почти полным отсутствием методов моделирования переноса тепла излучением. Только иногда, используя угловые коэффициенты и считая среду лучепрозрачной, удастся делать приближенные расчетные оценки. Это ограничивает применение пакета в металлургии, использующей высокотемпературные агрегаты, в которых энергия переносится главным образом излучением.

При решении трехмерных задач сопряженного теплообмена в объектах со сложной геометрией, требующих детального описания переноса тепла излучением и конвекцией, бесспорны преимущества программного комплекса ANSYS CFX перед другими пакетами программ. Пользователь, составляя программу расчета процессов в конкретном объекте, в частности, имеет возможность выбирать один из четырех методов решения уравнений радиационного теплообмена: метод Росселанда, метод π_1 , метод Discrete Transfer, метод Монте-Карло. Выбор метода обеспечивает или ускорение вычислений, или увеличение точности результатов моделирования.

ANSYS CFX – это профессиональный аналитический комплекс

⁵ Исследования на базе ANSYS CFX выполнены совместно с магистрантом УрФУ Бугриным И.С.

для решения термо–, гидро–, газодинамических задач⁶. В нем используется более 16 моделей турбулентности, ряд из которых описан в главе 1. Комплекс использует модели многофазных потоков. Модель движения твердых частиц (Lagrangian Particle Transport) позволяет учесть дискретные примеси в однородном потоке. Модель многофазного тепло- и массообмена позволяет рассчитывать кипение, испарение и кавитацию. Применение движущихся сеток очень важно для моделирования меняющейся геометрии расчетной области: описания взаимодействия ротор-статор во вращающихся машинах; моделирования компрессоров, насосов.

Для расчетов процесса горения используется ряд моделей, описывающих диффузионное, кинетическое и смешанное горение. К таким моделям относятся: модели, основанные на предположении о вихревой вязкости; модель с предварительно сгенерированной химической таблицей; модель горения с детальной химией; Flamelet-модель для диффузионного горения; модель для предварительно перемешанного и смешанного горения; модель для расчета образования окислов азота; модель для расчета выхода сажи; модель двухфазного горения; модель процессов воспламенения.

В ANSYS CFX успешно решаются многие практические задачи: моделируются задачи внешней аэродинамики средств транспорта, летательных аппаратов, движения сред и др. Строители определяют ветровые нагрузки и рассчитывают вентиляцию камер. В пакете можно исследовать течение в каналах, многофазные течения, определять гидравлические потери, решать задачи сопряженного теплопереноса, задачи расчета напряженного состояния, прочности.

Программа ANSYS CFX может использоваться для расчета камер горения, горелочных устройств, образования продуктов горения, окислов азота. Могут моделироваться процессы взрыва, может проводиться оптимизация конструкций агрегатов, теплообменников, рассчитываться трубопроводная и запорная арматура, реакторы, сепараторы, рациональные режимы работы тепловых устройств.

⁶ Кроме CFX в состав ANSYS входит *CFD–paket Fluent*, обладающий большими возможностями моделирования теплофизических процессов. Эти возможности больше, чем у ANSYS CFX, в расчете течений с горением, но меньше в расчетах теплообмена излучением [26].

Решение задач в ANSYS CFX проводится аналогично решению задач в ANSYS Myltiphusics и проходит ряд стадий (этапов), показанных на рис. 4.1. Геометрия объекта должна создаваться в сторонней CAD-программе и при первом знакомстве это может восприниматься негативно. Данное неудобство компенсируется большими возможностями программы по экспорту и импорту данных. Например, автор делает геометрические модели объектов в программе КОМПАС-3D, сохраняет их в формате Parasolid и экспортирует в программу ANSYS CFX. Иногда та же операция проводится с использованием программы SolidWorks, но результат в обоих случаях получается одинаковым.

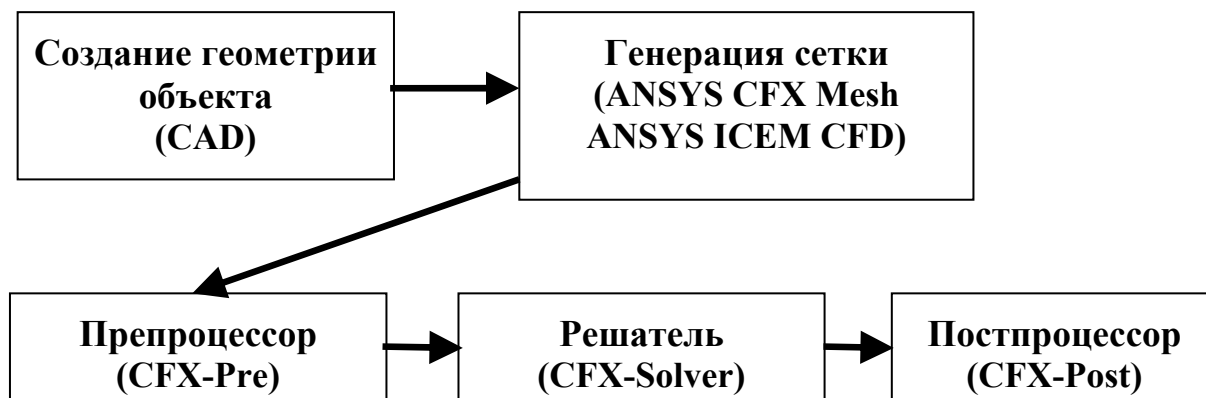


Рис. 4.1. Последовательность решения задач в ANSYS CFX

Пример выполнения геометрической модели объекта показан на рис. 4.2. Модель делалась для частного расчета в составе САЕ-анализа тепловой работы агрегата и потому включает только часть толкательной нагревательной печи с методической и сварочной зонами. Сетка строится или в приложении пакета CFX-Mesh, или в универсальном сеточном пакете ANSYS ICEM CFD. В примере с толкательной печью, описываемом ниже для иллюстрации метода, получена сеточная модель (см. рис. 4.3,а).

На следующем этапе решения определяется «физика задачи». Задаются регионы типа INLET, через которые среда входит в объект; регионы типа OUTLET, через которые среда уходит из объекта; регионы типа WALL – поверхности, ограничивающие части объекта, и т. д. Регионы поочередно выделяются курсором и на них задаются граничные условия.

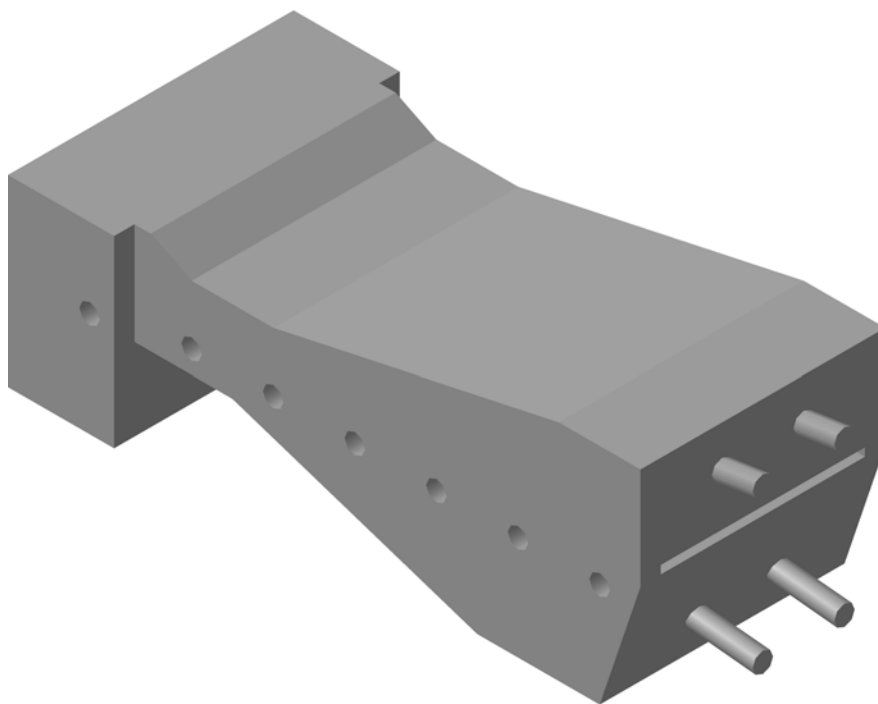


Рис. 4.2. Геометрическая модель участка методической нагревательной печи, выполненная в КОМПАС-3D

В схеме печи на рис. 4.2 моделями горелочных устройств считаются цилиндры с диаметром, равным диаметру горелочного туннеля. Торцы верхних цилиндров (горелок) рассматриваются как регион INLET1 со скоростью потока на входе 2,5 м/с и температурой 1500 °С. Торцы нижних горелок – регион INLET3 со скоростью дыма 3,5 м/с и температурой 1500 °С. Поскольку томильная зона на модели печи отсутствует, ее влияние учитывается в виде региона INLET2 со скоростью потока дыма (потока из-под пережима свода) 0,3 м/с и температурой на входе этого потока 1200 °С.

Регионом OUTLET на модели печи стала нижняя плоскость дымоотводящего канала, для которой задано избыточное давление 0 Па. Кроме того, задан регион METAL, имеющий тип WALL, – совокупность поверхностей нагреваемого металла, на которых задано табличное распределение температуры кусочно-линейной функцией. В таблице координатам длины печи – 0, 5, 10, 15 м; соответствуют температуры поверхностей металла – 303, 823, 1003, 1073 К. Регион

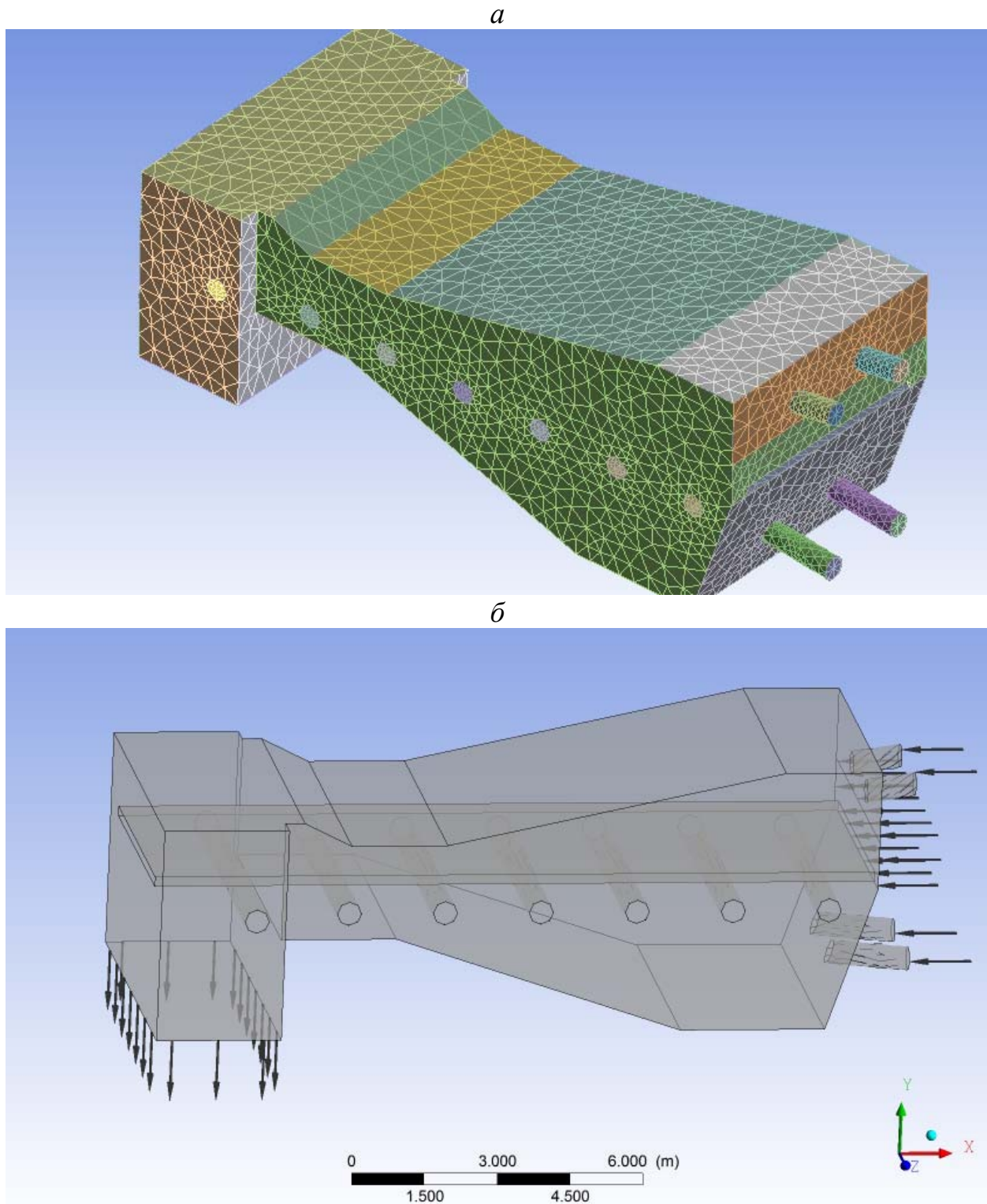


Рис. 4.3. Схема конечно-элементного разбиения расчетной области толкательной печи (*a*) и расчетная схема печи после задания граничных условий (*б*)

WALL обозначил совокупность всех стен печи с заданным коэффициентом теплопередачи $21 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ и температурой окружающей среды равной 30°C . Степень черноты поверхностей задана $\varepsilon = 0,8$.

Совокупность труб составила регион TUBES, имеющий тип WALL. Температура поверхности труб задана таблично.

Расчеты теплообмена проводились с использованием модели турбулентности К- ε , метода решения уравнения радиационного переноса Discrete Transfer и приближения «серого» излучения. Свойства газа задавались соответствующими свойствам дымового газа среднего состава при температуре 1000°C . После задания граничных условий получена расчетная схема печи, показанная на рис. 4.3,б.

Далее в соответствии со схемой на рис. 4.1 файл с постановкой задачи передается в решатель, затем в постпроцессоре результаты расчетов обрабатываются, проводится их визуализация.

4.3. Инженерный анализ при проектировании устройств нагрева металла

Использование ANSYS CFX в CAE-технологиях проектирования печей можно проиллюстрировать двумя примерами сравнительных расчетов, выполненных как часть систематического исследования влияния элементов конструкции на тепловую работу нагревательных печей.

4.3.1. Влияние на нагрев наклона горелок к поверхности металла

В нагревательных печах часто используются горелки, установленные в торцах зон отопления печей. Оси горелок ориентируют вдоль печи, но угол наклона их к поверхности металла может легко изменяться. При проектировании агрегатов представляет практический интерес определение рациональной величины угла наклона горелок, обеспечивающей максимальную полезную теплоотдачу.

Расчетный анализ теплообмена проводится для систем отопления нагревательных печей с шагающим подом (ПШП). Заготовки, нагревающиеся в печах, размещаются на поде на расстоянии друг от друга. Участки нижних поверхностей заготовок периодически поочередно приподнимаются над подом. Ниже металла появляется пространство, которое в зависимости от наклона горелок может по-разному продуваться печной средой и иметь разную температуру. Изменение температуры влияет на обогрев заготовок снизу.

Представленные ниже материалы получены в результате систематического расчетного исследования влияния конструктивных параметров на теплообмен в промышленных печах металлургии. Расчетная геометрическая модель объекта, представляющая собой зону ПШП, показана на рис. 4.4. Заготовки сечением 0,2 x 0,2 м приподняты над поверхностью пода на 0,1 м. До решения задачи задаются регионы модели и условия на их поверхностях. Регионом INLET1 обозначена плоскость, через которую в зону печи входят продукты горения из-под пережима свода (в этом регионе скорость газов в направлении нормали к поверхности равна $V_{Г1} = 0,2244$ м/с, их температура 1200 °С). Регион INLET2 – это торцовая плоскость цилиндра, изображающего горелку. Через эту плоскость проходят дымовые газы (скорость в направлении нормали к плоскости равна $V_{Г2} = 1,9299$ м/с, температура 1500 °С). Заданные для расчетов скорости газа обеспечивают равенство теплосодержаний потоков из горелки и из-под пережима свода. Регион OUTLET – левая на рис. 4.4 торцовая плоскость модели, через которую дымовые газы удаляются из зоны печи (здесь избыточное давление равно нулю); WALL1 – суммарная поверхность верхних поверхностей камеры (коэффициенты теплопередачи стенок и температура среды у их наружной поверхности считаются одинаковыми, $K_{СТ} = 21$ Вт/(м²·°С), температура окружающей печь среды $t_{ОКР} = 30$ °С, степень черноты $\varepsilon = 0,8$); WALL2 – нижняя поверхность зоны печи, моделирующая плоскую сплошную поверхность нагреваемого металла (температура поверхности «металла» – 800 °С, температура поверхности пода под металлом $t_{П} = 600$ °С, степень черноты $\varepsilon = 0,8$); WALL3 – суммарная поверхность боковых стенок камеры (на поверхностях задаются условия симметрии для газодинамической задачи и адиабаты для тепловой задачи). Задание условий симметрии на боковых

поверхностях позволяет заменить широкую печь совокупностью нескольких, сомкнутых боковыми поверхностями, зон, показанных на рис. 4.4.

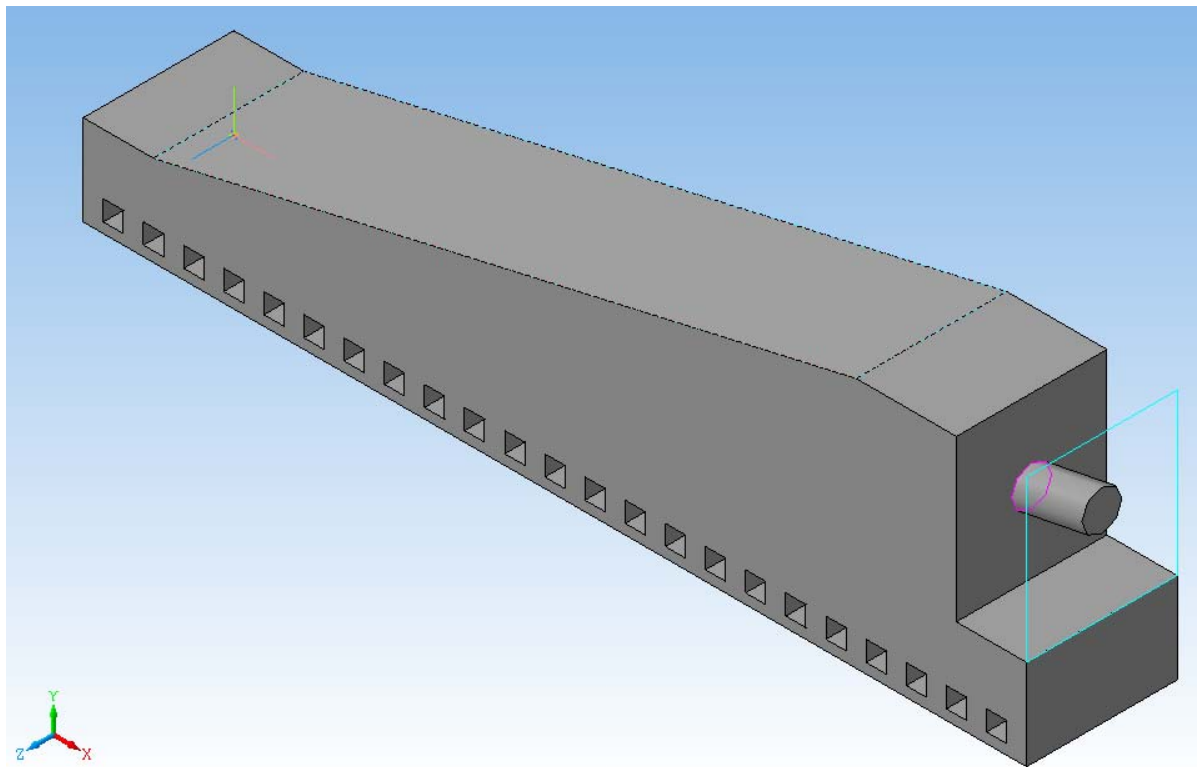
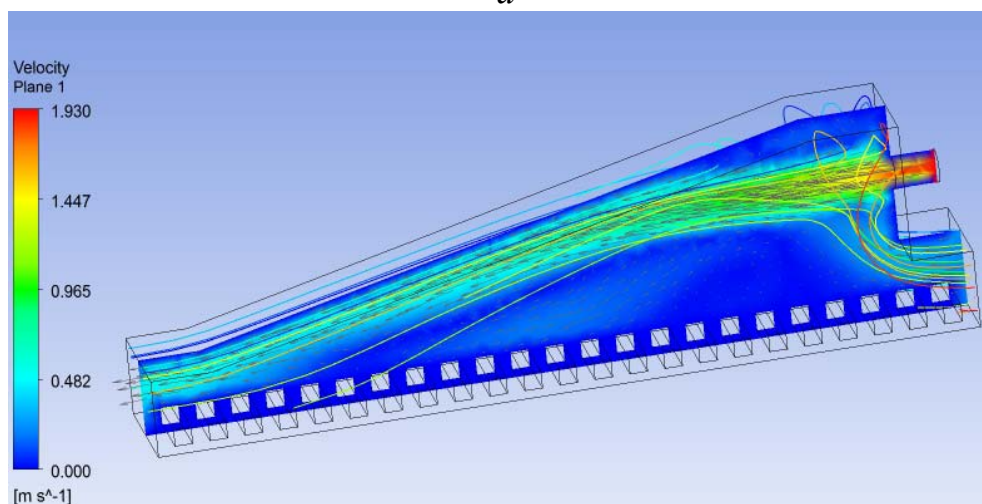


Рис. 4.4. Геометрическая модель зоны печи с шагающим подом в КОМПАС-3D

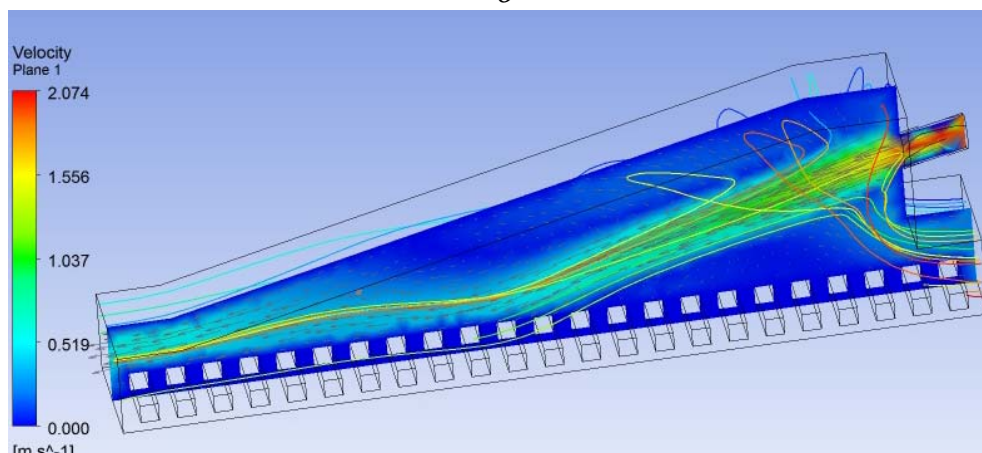
Теплофизические свойства дымовых газов заданы постоянными в объеме камеры, соответствующими свойствам дымовых газов среднего состава при температуре 1000°C : плотность $0,275$, динамическая вязкость $0,0000484$ Па·с, теплопроводность $0,109$ Вт/(м· $^{\circ}\text{C}$), теплоемкость 1306 Дж/(кг· $^{\circ}\text{C}$), молярная масса 31 кг/кмоль. В расчетах используется модель турбулентности К- ϵ , процесс теплообмена считается стационарным.

Расчеты выполнены для трех вариантов, отличающихся наклоном факела к поверхности заготовок металла: вариант а – ось горелки горизонтальна; б – малый угол наклона горелки к верхней поверхности металла; в – большой угол наклона горелки. Величины углов наклона, соответствующие вариантам а, б и в, показаны на рис. 4.5. Распределения температуры газов и поверхности свода в зоне с прямоугольными заготовками показаны на рис. 4.6.

a



б



в

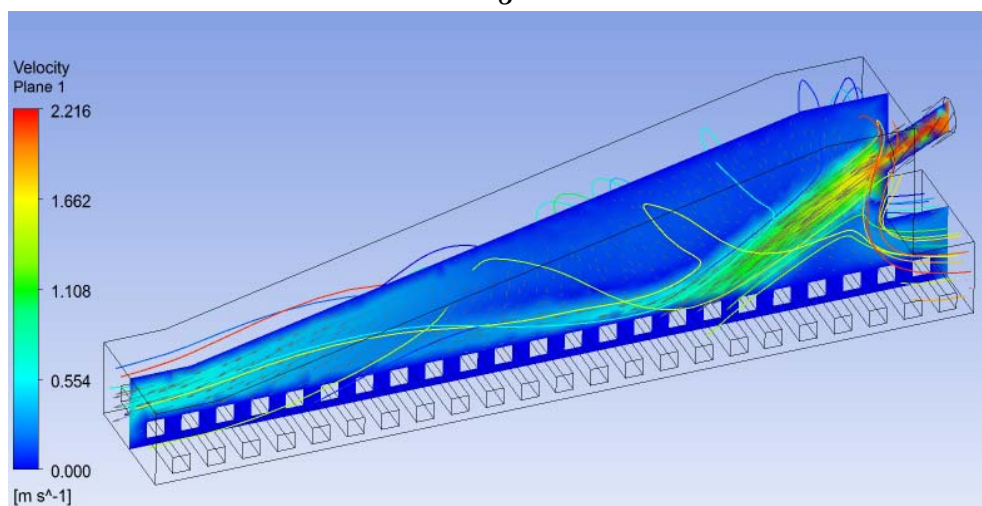
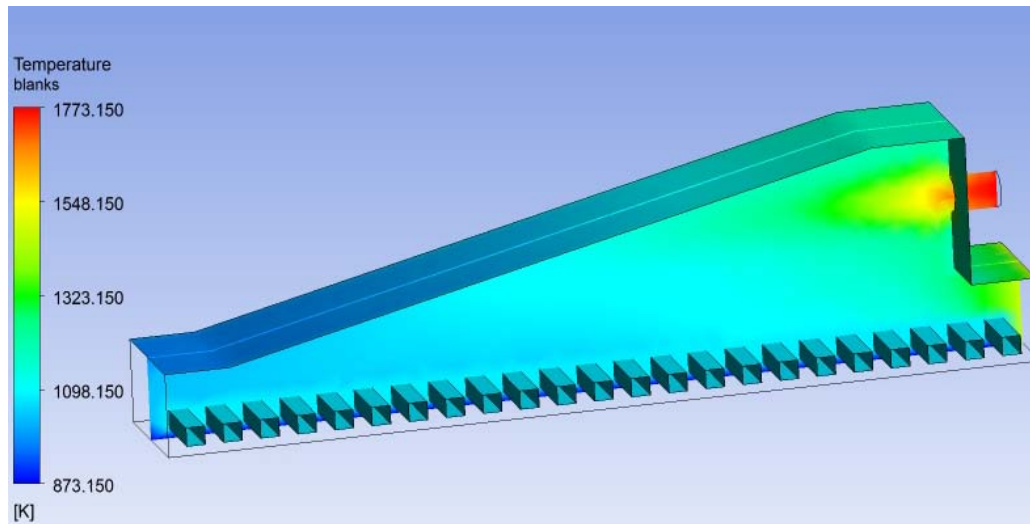


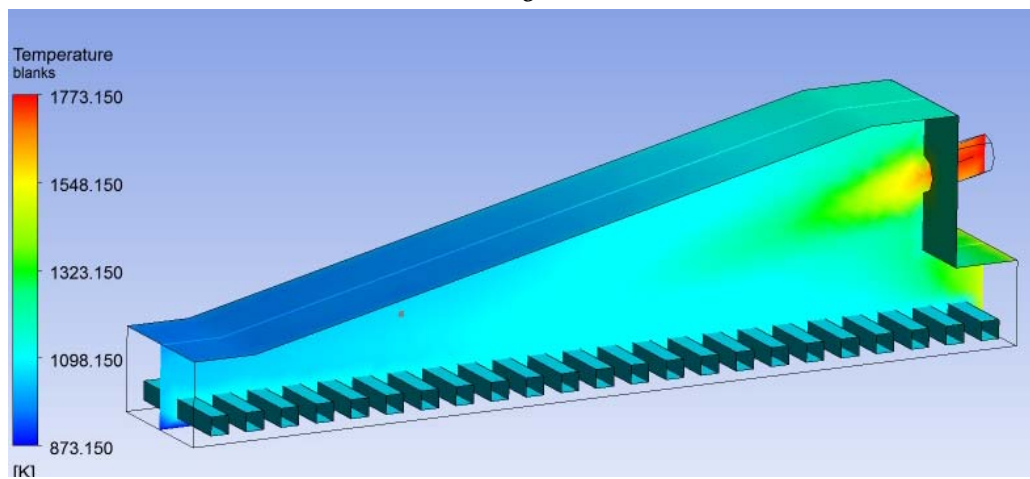
Рис. 4.5. Распределение скоростей и траекторий движения частиц газа в среднем продольном сечении зоны с прямоугольными заготовками:

a – ось горелки горизонтальна; *б* – малый угол наклона горелки; *в* – большой угол наклона горелки

a



б



в

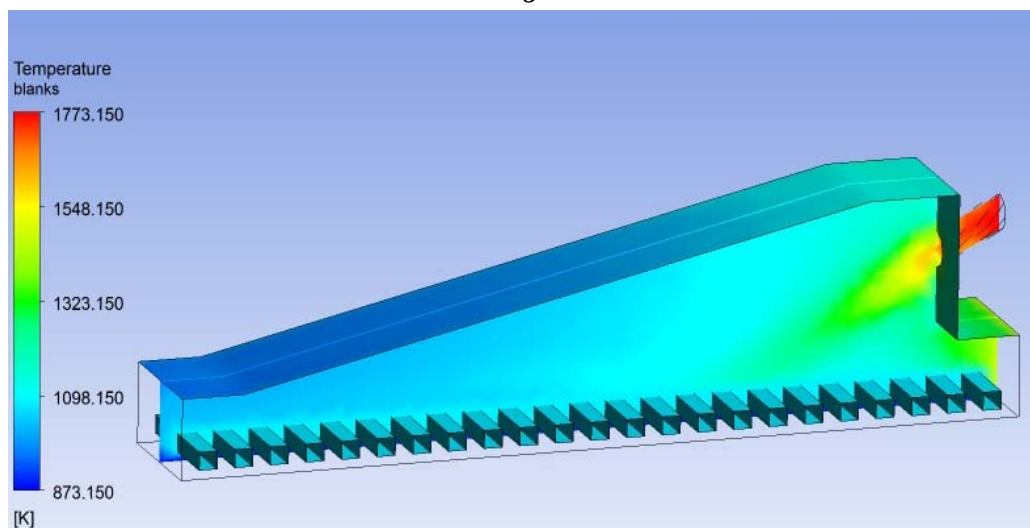


Рис. 4.6. Распределение температуры газов и поверхности свода в зоне с прямоугольными заготовками:
a – ось горелки горизонтальна; *б* – малый угол наклона горелки;
в – большой угол наклона горелки

Результаты описываемых расчетов показали, что существует некоторое положение оси горелки, при котором теплоотдача к металлу максимальна. Это следует из представленных ниже данных по изменению полезной теплоотдачи в зависимости от поворота оси горелок. Возможно, полученный эффект определен отличиями в движении газов у металла (пода) в удаленной от горелки половине печи при вариантах наклона факела б и в. Факел с большим наклоном оси как бы отталкивается рядом заготовок и плохо промывает пространство под заготовками. При увеличении угла наклона горелок к металлу (от варианта а к варианту в) средний тепловой поток к заготовкам сначала растет, а затем снижается. Однако эффект от оптимизации расположения горелок по теплоотдаче не превышает 4%.

Изменение полезной теплоотдачи

Вариант	Средний тепловой поток, воспринятый всеми поверхностями ряда заготовок, Вт/м ²
а	206 800
б	212 300
в	204 800

4.3.2. Поиск оптимальной конструкции пода ПШП

Во ВНИИМТ проводились эксперименты на огневом стенде [22,25], которые показали возможность интенсификации нагрева металла в печах с шагающим подом при увеличении высоты подъема ряда заготовок над уровнем пода. В опытах было определено и то, что оптимальная высота подъема заготовок над подом может меняться при изменении формы заготовок. Вероятно, на количественные результаты сравнений могут влиять особенности конструкции реальных печей и другие параметры, но

экспериментально проверить все варианты задачи невозможно. Поэтому необходима разработка и экспериментальная проверка математических моделей процессов, которые позволят моделировать и сопоставлять варианты конструктивных решений при проектировании агрегатов.

Поисковые расчеты выполнены для модели зоны печи с шагающим подом, описанной в предыдущей подглаве. В модели на поде печи расположен ряд заготовок сечением 0,2 x 0,2 м, которые подняты над поверхностью пода на 0,1 м (вариант а). Данная конструкция сравнивается с ее аналогами, в которых ряд заготовок был поднят над подом или на 0,2 м (вариант б), или на 0,3 м (вариант в). Конструктивные мероприятия, обеспечивающие необходимый подъем заготовок, на практике реализуются достаточно просто (использование профильного пода, подовых балок-рейтеров и др.).

В сравнительных расчетах заданы: температура поверхности заготовок металла $t_M = 600$ °С; коэффициент теплопередачи через стенки, ограничивающие зону сверху 21 Вт/(м² · град); коэффициент теплопередачи через кладку пода 10 Вт/(м² · град); температура среды, окружающей печь, 30 °С. Одинаковы в сравнительных расчетах: температура потока газов из горелки $t_{Г2} = 1500$ °С; температура газов, идущих из-под пережима свода $t_{Г1} = 1200$ °С; температура поверхности пода под металлом $t_{П} = 600$ °С; скорости потоков газа, подаваемых в зону печи $V_{Г2} = 1,9299$ м/с; $V_{Г1} = 0,2244$ м/с соответственно.

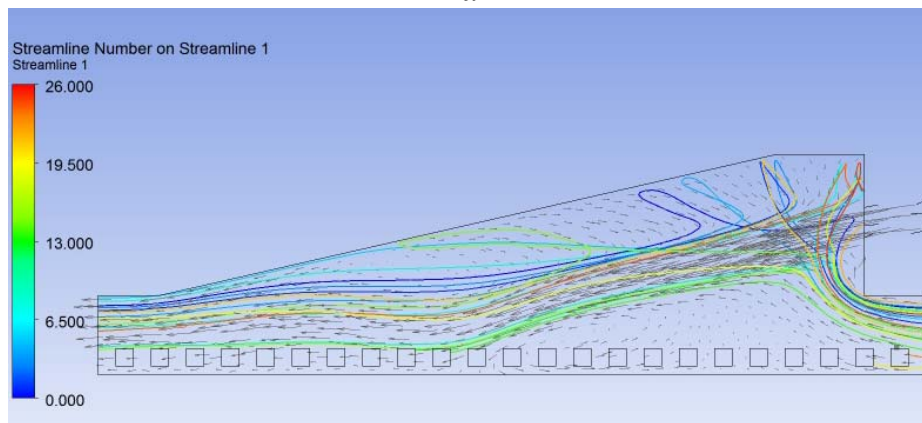
Результаты расчетов показаны на рис. 4.7 и 4.8. Данные о полном количестве тепла, поглощенном суммарно всеми заготовками металла, представлены ниже. Из этих данных следует, что полезное тепло на нагрев заготовок растет по мере подъема ряда заготовок над поверхностью пода (от варианта а к варианту в).

Таблица 4.1

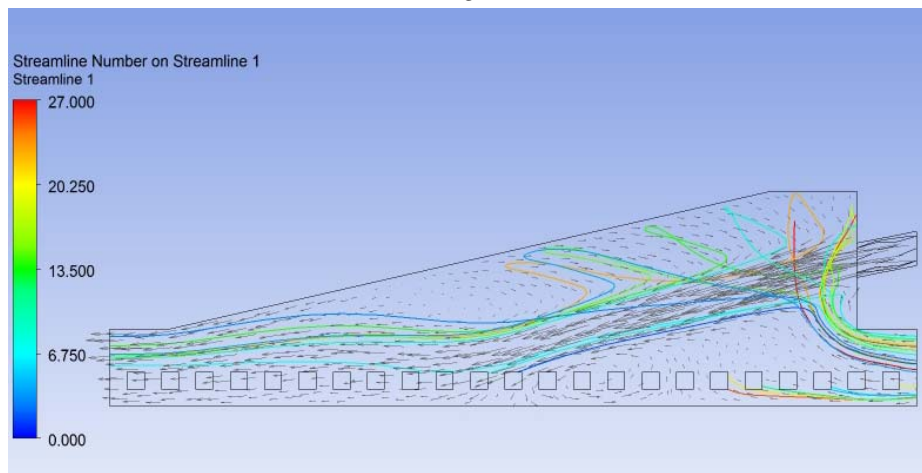
Зависимость теплоотдачи к металлу от высоты заготовок над подом

Вариант	Высота подъема заготовок над подом, м	Полный тепловой поток, воспринятый всеми поверхностями ряда заготовок, Вт/м ²
а	0,1	447 100
б	0,2	465 200
в	0,3	474 100

a



б



в

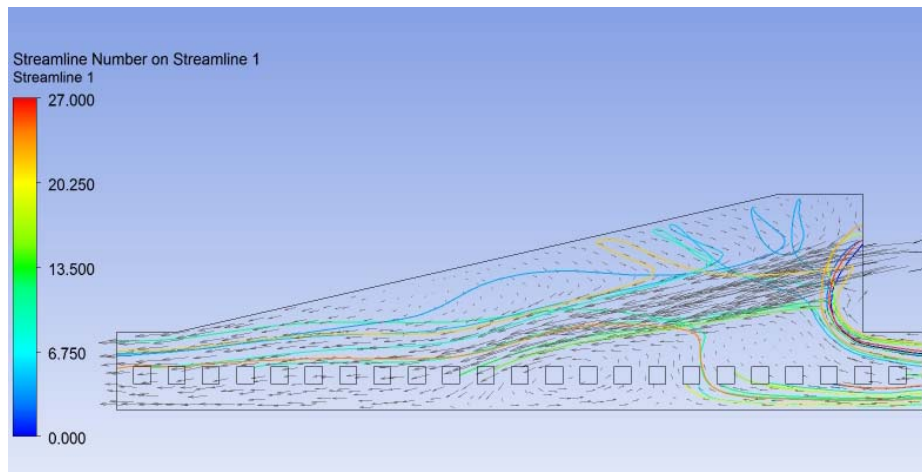


Рис. 4.7. Распределение скоростей и траекторий движения частиц газа в среднем продольном сечении зоны с прямоугольными заготовками: *a* – ряд заготовок на высоте 0,1 м над подом; *б* – ряд заготовок на высоте 0,2 м над подом; *в* – высота подъема заготовок 0,3 м

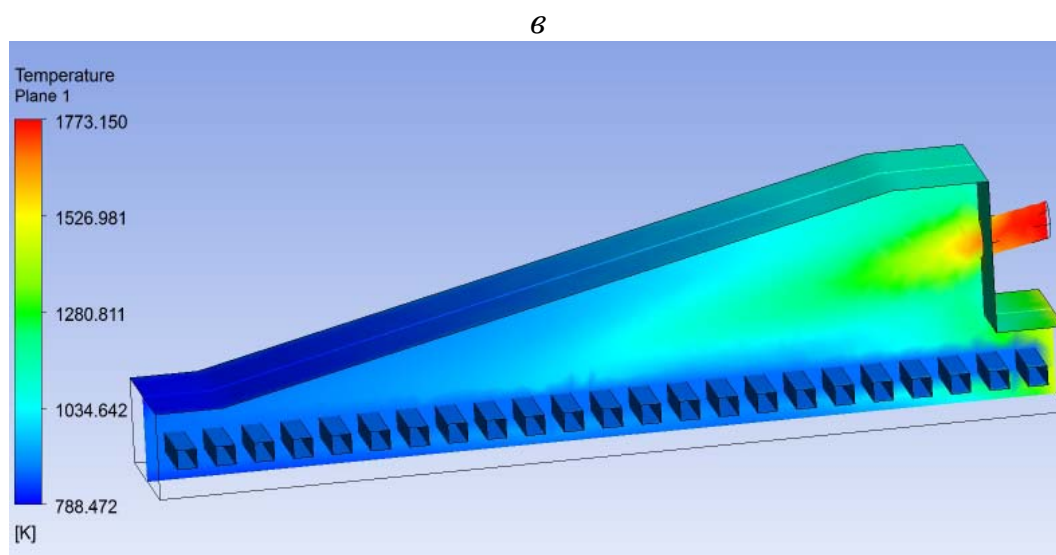
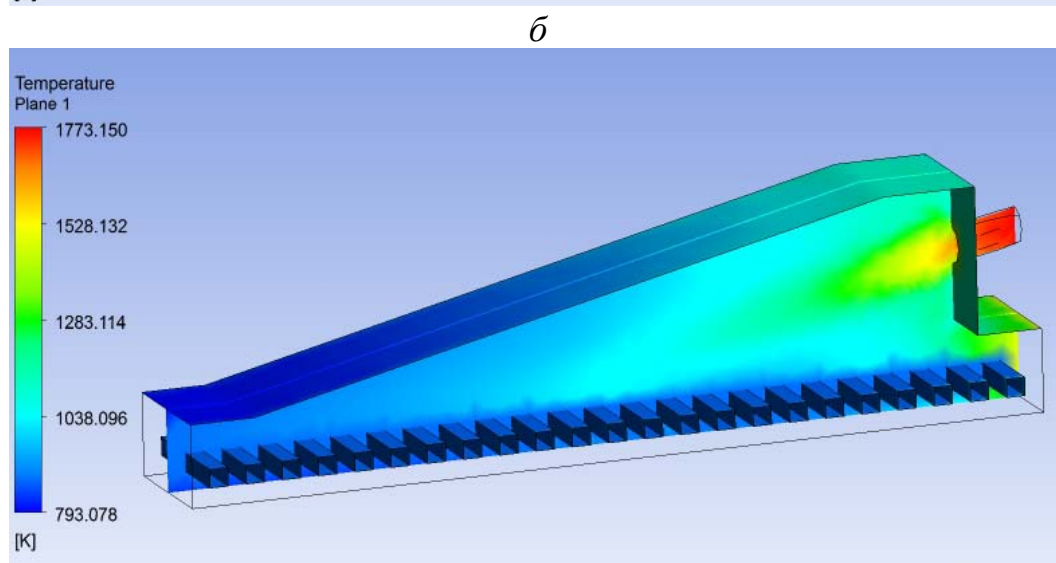
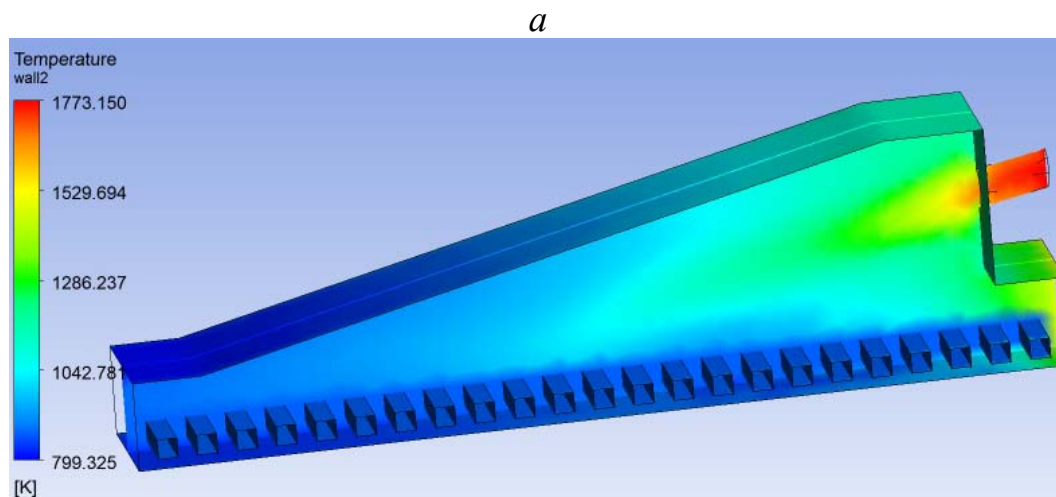


Рис. 4.8. Распределение температуры газов и поверхности свода:
a – ряд заготовок на высоте 0,1 м над подом; *б* – ряд заготовок на высоте 0,2 м над подом; *в* – высота подъема заготовок 0,3 м

Зависимость полезной теплоотдачи от высоты заготовок над подом, полученная в расчетах, качественно подтверждается данными экспериментальных исследований на огневом стенде [22]. Более точные данные сравнений можно получить при детальном описании камеры с металлом в модели теплообмена

Результаты расчетного исследования в целом позволяют сделать вывод о целесообразности конструирования нагревательных печей с шагающим подом, у которых расстояние от нижней поверхности заготовок до пода увеличено до 200–300 мм.

4.4. Пример использования ANSYS CFX при обосновании выбора способа отопления печей

Для разработки рекомендаций по проектному выбору типа системы отопления проведена серия сравнительных расчетных исследований теплообмена в печах для нагрева металла. На первом этапе разрабатывались математические модели процессов в огневых камерах, отапливаемых горелками разных конструкций. В качестве объекта использовался огневой стенд, условия балансовых опытов в котором воспроизводились исходными данными расчетов [22].

Сравнивались геометрические модели горелок, отличающиеся детальностью проработки их формы; с экспериментом сравнивались расчетные поля температуры, скорости среды, концентраций продуктов горения, давлений, полученные в расчетах с разными моделями радиационного переноса и горения. Проводилось сравнение теплоотдачи к металлу при разных способах отопления как стенда, так и камер реальных нагревательных печей.

Для иллюстрации возможностей использования программного пакета ANSYS CFX в инженерном анализе проектирования приведен рис. 4.9. На рисунке показано распределение линий тока дымовых газов, поле температуры в среднем вертикальном сечении и поле тепловых потоков на под в камере огневого стенда, отапливаемого сводовыми плоскопламенными горелками.

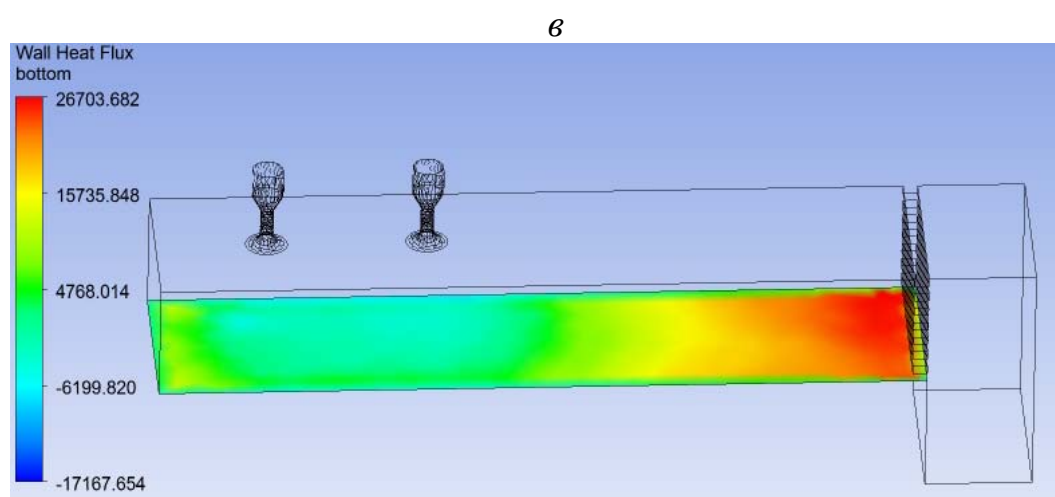
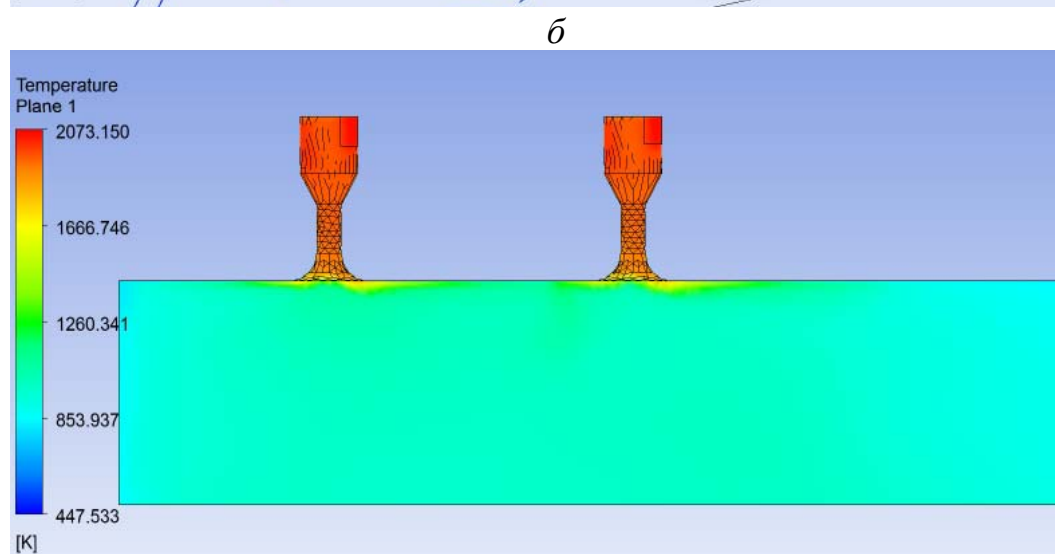
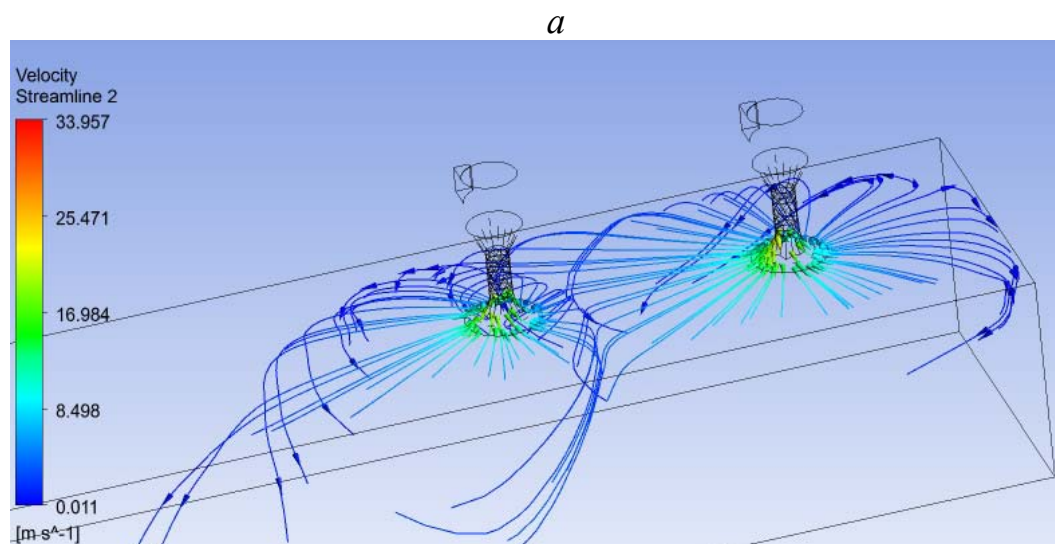


Рис. 4.9. Распределение линий тока (*a*), температуры в сечении горелок (*б*) и тепловых потоков на под (*в*) в камере стенда с плоскопламенными горелками

Библиографический список

1. Самарский А. А. Вычислительная теплопередача / А. А. Самарский, П. Н. Вабищевич. М. : Едиториал УРСС, 2003. 784 с.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. М. : Высшая школа, 1967. 600 с.
3. Теория тепломассообмена : учебник для вузов / С. И. Исаев [и др.]. М. : Высшая школа, 1979. 495 с.
4. Басов К. А. ANSYS в примерах и задачах / К. А. Басов. М. : Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
5. Чигарев А. В. ANSYS для инженеров : справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. М. : Машиностроение-1, 2004. 512 с.
6. Каплун А. Б. ANSYS в руках инженера : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. М. : URSS, 2004. 272 с.
7. Морозов Е. М. ANSYS в руках инженера : механика разрушения / Е. М. Морозов, А. Ю. Муйземнек, А. С. Шадский. М. : ЛЕНАНД, 2010. 456 с.
8. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей : учебник для вузов / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. М. : Metallurgia, 1990. 239 с.
9. Аникеев А. А. Основы вычислительного теплообмена и гидродинамики : учебное пособие / А. А. Аникеев, А. М. Молчанов, Д. С. Янышев. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 152 с.
10. Щербаков М. А. Сравнительный анализ моделей турбулентности с использованием научного кода «FASTEST-3D» и коммерческого пакета ANSYS CFX / М. А. Щербаков, А. А. Юн, Б. А. Крылов // Вестник МАИ, Т.16. 2009. № 5. С. 116–122.
11. Alvelius K. Direct numerical simulation of rotating channel flow at various Reynolds numbers and rotation number / K. Alvelius, A.V. Johansson In PhD thesis of K. Alvelius Dept. of Mecanics, KTN, Stockholm, 1999.
12. Хитрых Д. Проектирование турбомашин : обзор моделей турбулентности / Д. Хитрых // Ansys Solution. 2005. № 1(1). С. 9–11.

13. Планковский С. И. Моделирование турбулентных течений в катодных узлах плазменного оборудования / С. И. Планковский, О. В. Шипуль, В. О. Гарин // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 5(62). С. 32–39.

14. Белов И. А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб / И. А. Белов, Н. Ф. Кудрявцев. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1987. 223 с.

15. Денисов М. А. Исследование сложного теплообмена при разных схемах движения газов в рабочем пространстве печей / М. А. Денисов, Ф. Р. Шкляр, А. Х. Боковикова // Теплообмен излучением и сложный теплообмен : в кн. Тепломассообмен–5. Т. 8 / Минск: Ин-т тепло- и массообмена АН БССР, 1976. С. 276–285.

16. Денисов М. А. Влияние процесса рециркуляции на теплопоглощение металла в печах / М. А. Денисов, Ф. Р. Шкляр // Изв. вузов. Черная металлургия. 1977. № 6. С. 146–149.

17. Каст В. Конвективный тепло- и массоперенос / В. Каст, О. Кришер, Г. Райнике, К. Винтермантель. Пер. с нем. М. : Энергия, 1980. 49 с.

18. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений : учеб. пособие / И. А. Белов, С. А. Исаев. СПб. : Балт. гос. техн. ун-т, 2001. 108 с.

19. Слободянюк В.С. Моделирование вихревых и турбулентных течений в электродуговых устройствах : дис. ... докт. техн. наук / В. С. Слободянюк. Бишкек, 1996. 376 с.

20. Справочник конструктора печей прокатного производства : в 2 т. / под ред. В. М. Тымчака. М. : Металлургия, 1970. 576 с.

21. Казанцев Е. И. Промышленные печи : справочное руководство для расчетов и проектирования / Е. И. Казанцев. М. : Металлургия, 1975. 368 с.

22. Денисов М.А. Математическая модель расчета нагрева металла в печах с шагающим подом. Сообщение 1 / М. А. Денисов, Ф. Р. Шкляр, Г. А. Михалев // Изв. вузов. Черная металлургия, 1980. № 10. С. 96–99.

23. Денисов М.А., Булатов А.Т., Михалев Г.А., Бондаренко В.А. Исследование нагрева слябов из стали 09Г2ФБ в методических печах для контролируемой прокатки на толстолистовом стане 3600 / М. А. Денисов, А. Т. Булатов, Г. А. Михалев, В. А. Бондаренко // Совершенствование тепловой работы и конструкций

металлургических агрегатов : Тематич. отраслев. сб. / М. : Металлургия, 1982 (МЧМ СССР). С. 51–53.

24. Денисов М. А. Исследование тепловой работы и реконструкция методических толкательных печей стана 800 / М. А. Денисов, А. Т. Булатов, А. В. Краснов // Сталь. 1984. № 7. С. 89–91.

25. Конструктивные и режимные параметры печи с шагающим подом для нагрева трубных заготовок / М. А. Денисов, А. А. Кузовников, В. И. Легенький, Г. А. Михалев // Совершенствование системы отопления и повышение тепловой эффективности металлургических печей : Тематич. отраслев. сб. / М. : Металлургия, 1984 (МЧМ СССР). С. 15–19.

26. Юн А. А. Теория и практика моделирования турбулентных течений / А. А. Юн // М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 273 с.

Учебное издание

Денисов Михаил Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.
ANSYS и CAE-проектирование**

Редактор *И. В. Меркурьева*
Компьютерный набор *авторский*

Подписано в печать 15.11.2011. Формат 60х84 1/16.
Бумага типографская. Плоская печать. Усл. печ. л. 8,66.
Уч.-изд. л. 7,0. Тираж 100 экз. Заказ ...

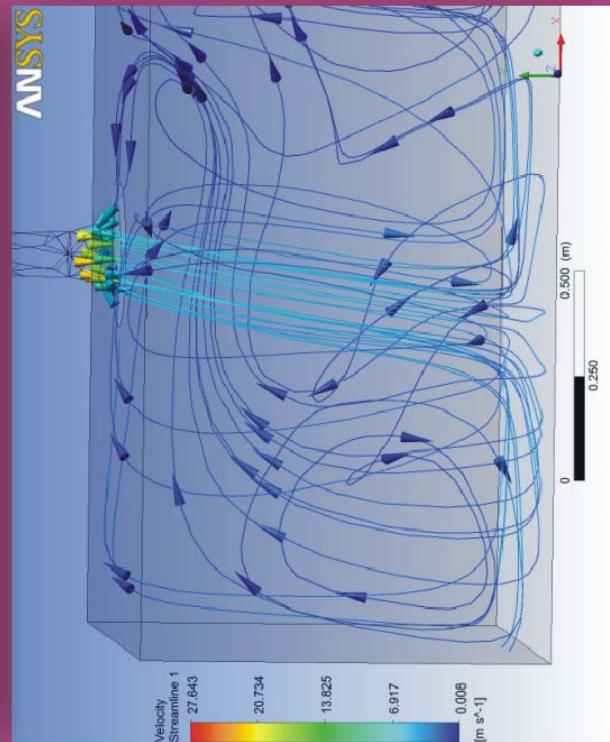
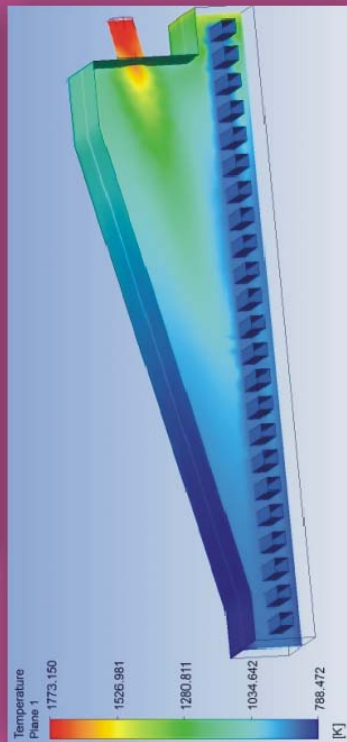
Редакционно-издательский отдел УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19
rio@mail.ustu.ru

Отпечатано в учебной лаборатории
полиграфических машин кафедры ДМ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-120.
Тел.: (343) 375-41-43



Денисов Михаил Александрович

Доктор технических наук, профессор кафедры "Теплофизика и информатика в металлургии" и кафедры "Инженерная графика" Уральского федерального университета (УГТУ-УПИ). Занимается разработкой методов расчетного и экспериментального исследования теплофизических процессов металлургии; совершенствованием тепловой работы и конструкций устройств нагрева металла; моделированием исторического процесса



Денисов М.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИКИ В ANSYS

М.А. Денисов

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. ANSYS и CAE- проектирование

